
BACHELORARBEIT

Frau
Anna-Maria Pöttker

**Einsatz von
3D-Laserscantechnik zum
Visualisieren von historischen
Gebäuden am Beispiel des
Kölner Doms**

2016

BACHELORARBEIT

Einsatz von 3D-Laserscantechnik zum Visualisieren von historischen Gebäuden am Beispiel des Kölner Doms

Autor:
Frau Anna-Maria Pöttker

Studiengang:
Angewandte Medien

Seminargruppe:
AM13wD1-B

Erstprüfer:
Prof. Hans-Joachim Götz, Dipl. Ing.

Zweitprüfer:
Dieter Claus

Einreichung:
Köln, 07.06.2016

BACHELOR THESIS

The application of 3D laser scanning technology in order to visualize historic buildings as illustrated by the example of Cologne Cathedral

Author:
Ms. Anna-Maria Pöttker

Course of studies:
Applied Media

Seminar group:
AM13wD1-B

First examiner:
Prof. Hans-Joachim Götz, Dipl. Ing.

Second examiner:
Dieter Claus

Submission:
Cologne, 07.06.2016

Bibliografische Angaben:

Pöttker, Anna-Maria:

Einsatz von 3D-Laserscantechnik zum Visualisieren von historischen Gebäuden am Beispiel des Kölner Doms

The application of 3D laser scanning technology in order to visualize historic buildings as illustrated by the example of Cologne Cathedral

2016 - 105 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2016

Abstract

Im Jahr 2015 wurde ein farbiges 3D-Modell des Kölner Doms im Maßstab 1:1 erstellt. Hierzu wurden die terrestrischen Laserscanner Z+F IMAGER® 5010C und Z+F IMAGER® 5010X eingesetzt. Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, die Umsetzung dieses Projekts zu untersuchen und kritisch zu bewerten. Es wird der Frage nachgegangen, ob sich das Projekt gelohnt hat. Dazu wurden Experten befragt und das fertige 3D-Modell des Doms analysiert. Das gesamte Projekt wurde von der Planung, über die Umsetzung, bis hin zur Fertigstellung untersucht. Im Ergebnis wird deutlich, dass sehr gut geplant und präzise gearbeitet wurde, da das Ziel eines maßstabsgetreuen 3D-Modells mit geringer Abweichung erreicht wurde.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	IX
1 Einleitung	1
2 Das Objekt: Der Kölner Dom.....	3
2.1 Die Geschichte des Kölner Doms.....	3
2.2 Die Ausstattung des Kölner Doms.....	4
2.3 UNESCO Weltkulturerbe.....	6
2.3.1 Konventionen von UNESCO.....	6
2.3.2 Kriterien für den Titel eines Weltkulturerbes.....	7
2.3.3 Pflichten Durch den Titel.....	9
2.3.4 Konsequenzen bei Nichterfüllung der Pflichten.....	9
2.4 Die Dombauhütte.....	10
2.5 Der Zerfall des Kölner Doms.....	11
3 Zoller und Fröhlich.....	14
4 Technologie.....	14
4.1 Z+F IMAGER® 5010C.....	15
4.2 Z+F IMAGER® 5010X.....	16
4.2.1 Bauart.....	17
4.2.2 Reichweite.....	17
4.2.3 High Dynamic Range.....	18
4.2.4 Laserklassen.....	20
4.3 Andere Scanner und Anwendungsbereiche.....	21
5 Terestrisches Laserscanning.....	22
5.1 Punktwolken.....	25

6 Warum 3D-Visualisierung?	26
7 Der Kölner Dom in 3D	27
7.1 Planung und Vorbereitung	28
7.2 Festpunkte und Besonderheiten	31
7.2.1 Im Dom	32
7.2.2 Die Türme	24
8 Anwendungssoftware	35
8.1 Autodesk ReCap	36
8.2 Z+F Laser Control	27
8.3 Leica Cyclone	40
9 Beurteilung der Visualisierung	42
10 Fazit	48
Literaturverzeichnis	X
Anlagen	XVIII
Eigenständigkeitserklärung	LIII

Abkürzungsverzeichnis

CAD

... Computer Aided Design

HDR

... High Dynamic Range

LOD

... Level of Detail

RCS

... ReCap Scene

TLS

... terrestrisches Laserscanning

Z+F

... Zoller und Fröhlich GmbH

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Kölner Dom.....	1
Abbildung 2: Gero-Kreuz im Kölner Dom.....	6
Abbildung 3: Der alte Kran.....	12
Abbildung 4: Schäden am Kölner Dom.....	12
Abbildung 5: Schäden am Kölner Dom 2.....	12
Abbildung 6: Gefärbtes Gestein bei der Säuberung.....	13
Abbildung 7: Fehlende Figuren am Kölner Dom.....	13
Abbildung 8: Z+F IMAGER® 5010C.....	15
Abbildung 9: Klassifizierungen von Laserscannern.....	17
Abbildung 10: Über- und Unterbelichtete Bilder.....	19
Abbildung 11: Fertiges HDR-Bild.....	19
Abbildung 12: Darstellung der Abmessung des Laserscanners.....	23
Abbildung 13: 3D-Scan (ohne Texturen) im Vergleich zum Original.....	25
Abbildung 14: Scanner auf Kran im Kölner Dom.....	28
Abbildung 15: Herablassen des Scanners an spezieller Konstruktion.....	29
Abbildung 16: Scanner mit spezieller Konstruktion zum Scannen der Türme.....	34
Abbildung 17: Workflow mit ReCap Photo ®.....	37
Abbildung 18: Punktwolke mit überflüssigen Datensätzen.....	38
Abbildung 19: Invalid Filter.....	39
Abbildung 20: Intensity Filter.....	39
Abbildung 21: Range Filter.....	39
Abbildung 22: Mixed Filter.....	39
Abbildung 23: Thin Filter.....	39
Abbildung 24: Single Pixel Filterns.....	39
Abbildung 25: Punktwolke vor Smooth-Surface-Filter.....	41
Abbildung 26: Punktwolke nach Smooth-Surface-Filter.....	41
Abbildung 27: TIN Mesh als Wireframe.....	41

Abbildung 28: TIN Mesh mit Struktur.....	41
Abbildung 29: Erhebung im Modell.....	42
Abbildung 30: Loch nach Entfernung der Erhebung.....	42
Abbildung 31: Gefülltes Loch.....	42
Abbildung 32: Original.....	45
Abbildung 33: 3D-Modell.....	45
Abbildung 34: Innenraum des Kölner Doms (ohne Farbe).....	46
Abbildung 35: Innenraum des Kölner Doms (mit Farbe).....	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Formate für die Arbeit mit Punktwolken.....	36
Tabelle 2: Funktionen der Filter von Z+F Laser Control.....	38

1 Einleitung

In der heutigen Zeit bekommen Umweltverschmutzung und Terrorismus einen immer größer werdenden Stellenwert. Nicht nur die Natur, sondern auch viele bedeutende Werke der Menschheitsgeschichte werden unwiederbringlich von Menschenhand zerstört. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Sphinx in Ägypten, die im zweiten Weltkrieg ihre Nase verlor, als deutsche Soldaten sie beschossen. Es kann jederzeit passieren, dass einmalige Kunstwerke in Teilen oder zur Gänze verloren gehen. Gleichzeitig schreitet die technologische Entwicklung immer weiter voran und ermöglicht vieles, was vor 50 Jahren noch kaum vorstellbar war. Heutzutage können nicht nur für die Unterhaltungsbranche ganze Welten in 3D erzeugt werden die 3D-Technik wird auch für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt und ermöglicht es, die umgebene Realität einzuscannen und zu untersuchen.

Dieses Thema wird an einem aktuellen Beispiel deutlich. Im Jahr 2015 wurde der Kölner Dom in 3D in einem Maßstab von 1:1 eingescannt, um diesen nicht nur nachhaltig digital für die Nachwelt zu erhalten, sondern auch, um die Möglichkeit zu haben, Schäden und Veränderungen an ihm zu untersuchen. Sollte dem Kölner Dom zukünftig etwas durch Umwelteinflüsse oder menschliches Einwirken zustoßen, ist sein jetziger Zustand für immer digital dokumentiert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Vorgang des Scannens, wie die Technik funktioniert und welche Möglichkeiten sich daraus ergeben. Es wird zudem die Frage kritisch beleuchtet, ob sich der aufwändige Vorgang gelohnt hat.

Um diese messbar zu machen, untersucht die Verfasserin zunächst, ob der Kölner Dom gefährdet ist, und welche Einflüsse auf ihn einwirken. Es wird untersucht, ob das Ergebnis der Scandaten wirklich so gut ist, wie es vorher versprochen wurde. Was macht den Kölner Dom dabei im Vergleich zu anderen Werken der Menschheitsgeschichte so besonders? Zeitaufwand und Umfang des Projektes werden hierbei beleuchtet. Um die Fragen zu beantworten werden zum einen Experteninterviews geführt und zum anderen der Vorgang des Scannens und die ermittelten Scandaten von der Verfasserin untersucht.

Um zunächst festzustellen, was den Kölner Dom als Kirche besonders auszeichnet, wird dieser als Objekt beleuchtet. Es wird untersucht, was ihn von anderen Kirchen und Gebäuden unterscheidet. Im zweiten Kapitel wird ergründet, welche Schäden der Dom aufweist und was bislang unternommen wird, um diesen vorzubeugen.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit der Firma Zoller + Fröhlich. Es wird untersucht, welche Herkunft diese Firma hat und was sie mit dem Projekt verbindet. Hierzu wird auf die Firmengeschichte zurückgegriffen.

Das darauffolgende vierte Kapitel untersucht die Technologie und somit die Scanner, welche beim Scannen des Doms eingesetzt wurden. Hierbei wird darauf eingegangen, warum gerade diese Scanner eingesetzt wurden. Die Besonderheiten dieser Scanner im Vergleich zu anderen Scannern werden untersucht.

Das fünfte Kapitel untersucht die Softwarekomponenten, die bei dem Vorgang wichtig sind. Es wird untersucht, wie die Scanner genau funktionieren. Im Anschluss wird beleuchtet, wie man aus den aufgenommenen Daten ein fertiges 3D-Modell erzeugt.

Das sechste Kapitel beantwortet die Frage, warum der Vorgang des 3D-Laserscannens durchgeführt wurde. Es wird untersucht, welche Hoffnungen in das Projekt gesetzt wurden und mit welchen Zielen dieses durchgeführt wurde. Hierzu werden Experteninterviews zur Hilfe genommen.

Da man jetzt weiß, wie das System funktioniert, wird im siebten Kapitel untersucht, wie das Objekt des Kölner Doms eingescannt wurde. Gab es hierbei besondere Herausforderungen? Was musste beachtet werden? Diese Fragen werden zusammen mit dem genauen Vorgehen in und um den Dom untersucht. Hierbei werden zusammen mit dokumentarischem Material Experteninterviews zur Hilfe genommen.

Im anschließenden achten Kapitel wird untersucht was sich beim Visualisieren der Scandaten bei diesem speziellen Beispiel ergeben hat. Experten beantworten, welche Software in diesem Fall benutzt wurde und wie die Daten zusammengefügt wurden. Welche Besonderheiten traten hierbei auf und wie sieht das Ergebnis aus?

Das neunte Kapitel befasst sich mit der Beurteilung der ermittelten Daten. Es wird von der Verfasserin untersucht, ob die Daten wirklich das halten, was vorher versprochen wurde. Hierbei wird darauf eingegangen, wie genau die Daten tatsächlich sind. Außerdem wird der Aufwand bewertet, der mit dem Vorgang einherging.

Das zehnte Kapitel enthält das Fazit, welches die vorher ermittelten Daten zusammenfasst. Es wird von der Verfasserin beurteilt, ob sich der Vorgang des 3D-Laserscannens am Beispiel des Kölner Doms gelohnt hat. Zudem wird kurz erschlossen, was dies für zukünftige Projekte bedeuten kann und ob es Kritikpunkte gibt, die bei anderen Projekten zu einem verbesserten Vorgehen führen könnten. Zusammen mit den positiven Aspekten wiegt die Verfasserin ab, ob sich das Projekt gelohnt hat.

2 Das Objekt: Der Kölner Dom

Der Vorgang des 3D-Laserscannings wurde am Kölner Dom (Abb. 1) durchgeführt. Das historische Gebäude, das als UNESCO Weltkulturerbe eingetragen ist, bedarf ständiger Restaurierung. Diese soll durch die Ergebnisse des Scannens vereinfacht werden. Zudem wird der Dom auf diese Weise als 3D-Modell für die Nachwelt erhalten. Was diese Kirche so besonders macht, dass der Vorgang des 3D-Laserscannings an ihr durchgeführt wurde und welche Ergebnisse sich dadurch erhofft werden, wird im Folgenden erläutert.



Abbildung 1: Der Kölner Dom
(Quelle: Deml [2010], o.S.)

2.1 Die Geschichte des Kölner Doms

Der Kölner Dom ist seit dem Jahre 1996 im Verzeichnis des UNESCO-Weltkulturerbes aufgeführt. Bei seiner Fertigstellung nach einer Bauzeit von 1248 bis 1880 galt der Dom als größtes Gebäude der Welt.¹ Bevor der jetzige Kölner Dom erbaut wurde, stand vom achten bis zum 13. Jahrhundert eine andere Kirche an seiner Stelle, der sogenannte karolingische Dom. 1164 brachte Erzbischof Rainald von Dassel die Gebeine der Heiligen Drei Könige nach Köln. Da jetzt diese Reliquien dort aufbewahrt wurden, sollte die Fassade des Doms spektakulärer wirken und der Bau des gotischen Doms wurde eingeleitet. Der alte Dom musste nach und nach dem neuen weichen. Die anschließenden Bauarbeiten dauerten bis ins Jahr 1880, als die beiden Türme des Doms fertiggestellt wurden. Es wurden mit der Zeit Teile der alten Kirche abgerissen, damit an diesen Stellen der Dom neu aufgebaut werden konnte.

¹ Vgl. Deutsche UNESCO-Kommission e.V. [2016 a], o. S.

Geplant war ursprünglich, nur einen Teil des alten Doms abzureißen. Da aber im Jahre 1248 der alte Dom aufgrund eines Unfalls komplett abbrannte, musste der Kölner Dom von Grund auf neu gebaut werden. Die Aufbauarbeiten wurden neu geplant und Teile der alten Kathedrale wurden temporär neu aufgebaut, damit die Messen abgehalten werden konnten.

Der neue Dom wurde von Gerhard von Rile nach französischem Vorbild in gotischem Stil entworfen. Der Dom wurde bis 1530 in diesem Stil wieder aufgebaut, bis die Baumaßnahmen vorläufig gestoppt wurden, da sowohl das Geld als auch das Interesse an diesem Baustil nachließen. 1842 griff König Friedrich Wilhelm IV. den Bau des Doms wieder auf. Trotz der privaten Investition seinerseits, reichte das Geld jedoch nicht, um den Kölner Dom weiter auszubauen. Zusammen mit einer bereits erhobenen Kirchensteuer, Spendenaufrufen und einer Dombaulotterie wurde das Geld schließlich aufgebracht.²

Im Zweiten Weltkrieg erlitt der Kölner Dom Treffer von insgesamt vierzehn Fliegerbomben. Diese hatten Schäden zur Folge, die dazu geführt haben, dass der Dom bis heute restauriert werden muss. Zusätzlich zu den Kriegsschäden kämpft der Kölner Dom mit Schäden durch Verwitterung und die Umwelt, weswegen der Dom stetig restauriert werden muss und als „ewige Baustelle“ bezeichnet wird.³

Er umfasst eine Gesamtlänge von 144,58 Metern und eine Höhe von 157,31 Metern an seinem höchsten Punkt. Die zwei Türme des Kölner Doms sind jedoch nicht gleich groß. Der Nordturm ist sieben Zentimeter höher als der Südturm, der für die Öffentlichkeit zur Besichtigung zur Verfügung steht.⁴

Heute gilt der Kölner Dom mit den Reliquien der Heiligen Drei Könige nicht nur als eine der wichtigsten Wallfahrtsstätten für Katholiken, er ist auch ein beliebter Anlaufplatz für Touristen. Der Dom ist über das ganze Jahr hinweg täglich für die Öffentlichkeit zugänglich. Mehrmals am Tag finden Messen statt.⁵

2.2 Die Ausstattung des Kölner Doms

Der Kölner Dom beherbergt eine Vielzahl an Kunstwerken, die in und an ihm verbaut sind und repräsentativ für die Epoche der Gotik sind. Dazu zählen die Fenster, die im

² Vgl. Gummich/Buth [2016], o.S.

³ Vgl. Schock-Werner [2016], o. S.

⁴ Vgl. NetCologne Gesellschaft für Telekommunikation mbH [2016], o. S.

⁵ Vgl. Katholisches Stadtdekanat Köln [ohne Jahr], o.S.

Kölner Dom verbaut wurden. Einige dieser Kunstwerke waren Geschenke, die über die Zeit hinweg dem Dom dargebracht wurden und ihn bereichert haben. Im Dom sind zum Beispiel 15 Fenster mit einer Gesamtfläche von 850 Quadratmetern verteilt.

Hierbei ist das Achsenfenster des Kölner Doms hervorzuheben. Dieses zeigt die Heiligen Drei Könige, wie sie zu Maria und ihrem Kind treten. Dieses Fenster spielt auf den historischen Hintergrund des Doms mit seiner Verbindung zu den Gebeinen der Heiligen Drei Könige an.

Das älteste Fenster des Doms ist eines, das um das Jahr 1260 herum für die Kölner Dominikanerkirche zum Heiligen Kreuz angefertigt wurde und erst 1892 als erstes gotisches Fenster im Kölner Dom verbaut wurde. Dieses Fenster war zu der Zeit das erste farbige Fenster des Kölner Doms. Heute sind alle Fenster um den Innenraum des Doms in Farbe gehalten.

Der Kölner Dom zeichnet sich nicht nur durch seine zahlreichen Fenster aus, sondern auch durch die Figuren, welche in und um den Dom verbaut sind. Um das Jahr 1270 herum wurden die ersten Chorpfeilerfiguren hergestellt und am Dom platziert. Diese Figuren verkörpern die zwölf Apostel zusammen mit Jesus Christus und der heiligen Mutter Maria.

Um das Jahr 1308 herum entstand das Chorgestühl mit einer Anzahl von 104 Sitzen. Mit dieser Größe ist es das größte in Deutschland und zusammen mit den Chorschranken, welche um 1332 herum entstanden, sind diese Werke ein repräsentatives Beispiel für die Monumentalmalerei in Deutschland im 14. Jahrhundert.

Ähnlich wie das älteste Fenster des Doms sind auch die beiden Altäre des Doms nicht für diesen angefertigt worden. Der Clarenaltar hat seinen Ursprung in der Franziskanerinnenklosterkirche St. Clara. Der andere Altar, der Dreikönigenaltar, kommt aus der Kölner Ratskapelle.

Das Kruzifix, eines der ältesten im Dom zu sehenden Ausstellungsstücke, hat seine Herkunft im Gegensatz zu den schon Genannten im Dom selbst. Um das Jahr 975 herum wurde das überlebensgroße Kruzifix für den Vorgänger des Kölner Doms angefertigt, welcher später den Bauarbeiten des Doms weichen musste.⁶

6 Vgl. Hoffmann/Keller/Thomas/Arens [2001], S. 127 ff.

Das sogenannte Gero-Kreuz (Abb. 2) besteht aus Eichenholz, ist etwa drei Meter groß und zeigt einen gekreuzigten, sterbenden Mann. An seiner Seite ist eine große Wunde zu erkennen. Dieses Abbild war bis in Mittelalter eine Vorlage für andere Kruzifixe, die Jesus Christus bei seiner Kreuzigung zeigen. Dieses Monument im Kölner Dom ist daher ein wichtiger Bestandteil der Kunstgeschichte.⁷



Abbildung 2: Gero-Kreuz im Kölner Dom (Quelle: Academic [ohne Jahr], o.S.)

2.3 UNESCO Weltkulturerbe

In Deutschland gibt es 40 Welterbestätten. Zu diesen gehört der Kölner Dom. Weltweit sind ca. 1000 Orte von der UNESCO als Weltkulturerbe ausgezeichnet worden. 1978 wurde der Aachener Dom als erstes deutsche Bauwerk mit diesem Titel geehrt. Um den Titel Weltkulturerbe zu erhalten, muss zuerst eine Bewerbung stattfinden, die geprüft und über die positiv entschieden werden muss.⁸

2.3.1 Konventionen von UNESCO

Die UNESCO hat sich selbst zum Ziel gesetzt, Wissen und historisch wertvolle Orte für die Nachwelt zu erhalten. Die Menschheit soll auch in Zukunft in der Lage sein, aus den Werken vergangener Generationen zu lernen. Als Kulturerbe wird allgemein alles bezeichnet, was von Menschen geschaffen wurde und für die Nachwelt erhalten werden muss. Als Naturerbe werden natürliche Orte bezeichnet, die in Ihrer Art einzigartig sind und deshalb geschützt werden müssen.

Um dies zu tun, hat die UNESCO 1954 die „Haager Konvention zum Schutz von Kulturgut bei bewaffneten Konflikten“ verabschiedet, um eine Lösung bezüglich der Probleme zu finden, die sich durch den Zweiten Weltkrieg und den daraus resultierenden Kriegsschäden ergeben. Allerdings hat diese Konvention nicht zum gewünschten Ziel geführt, sondern eher dazu, dass in einigen Ländern Denkmäler gezielt ausgesucht und beschädigt wurden.

⁷ Vgl. Müller [2013], o.S.

⁸ Milbrandt [2015], o.S.

Infolgedessen wurde 1972 eine neue Konvention verabschiedet, die 1975 in Kraft trat und besser verhindern sollte, dass Kulturgüter zerstört werden. Die „Konvention zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt“ wurde von 20 Ländern unterzeichnet. Um festzustellen, welche Orte und Stätten schützenswert sind, wird von der UNESCO die „Liste des Welterbes“ geführt, welche bis dato stetig erweitert wird. Wenn ein Ort gefunden ist, der in diese Liste aufgenommen werden soll, bedarf es der Zustimmung des jeweiligen Staates, in dem sich der Ort oder die Stätte befindet. Da die jeweiligen Staaten unterschiedliches Interesse daran haben, ist das Ergebnis, dass es immer noch Orte gibt, die die Kriterien zwar erfüllen würden, aber nicht in der Liste aufgenommen sind, und somit auch nicht durch die Konventionen der UNESCO geschützt werden.⁹

2.3.2 Kriterien für den Titel eines Weltkulturerbes

Orte, die in der Welterbeliste der UNESCO eingetragen sind, gelten als besonders wertvoll. Damit etwas den Titel des Weltkulturerbes erhält, muss es einzigartig sein und einen einmaligen Wiedererkennungswert haben. Es darf kein vergleichbares Werk geben. Zudem muss es bereits ein Vorhaben und ein Programm geben, das gewährleistet, dass das Weltkulturerbe dauerhaft erhalten wird. Der Titel des Weltkulturerbes sagt aus, dass ein Gebäude oder eine Naturlandschaft es besonders verdient, erhalten zu werden. Nach erfolgreicher Auszeichnung wird besonderer Wert darauf gelegt, dass das Erbe nachhaltig für die Nachwelt geschützt wird, indem es gepflegt und gegebenenfalls restauriert wird.¹⁰

Die UNESCO gibt sechs Kriterien für die Aufnahme eines Kulturerbes und fünf für die eines Naturerbes vor. Ein Denkmal muss für die Aufnahme mindestens einem dieser Kriterien entsprechen. Ob dies zutrifft entscheiden zwei Organisationen, die der UNESCO als beratende Kraft zur Seite stehen. Für den Titel des Weltkulturerbes steht die Organisation ICOMOS UNESCO beratend zur Seite. Für den Titel des Naturerbes übernimmt diese Rolle die Organisation IUCN.

Das erste Kriterium für die Aufnahme als Kulturerbe ist, dass das Denkmal ein „Meisterwerk menschlicher Schöpferkraft“ sein muss. Dieses Kriterium wurde beim Kölner Dom erfüllt, weshalb er in die Liste aufgenommen wurde. Das zweite Kriterium ist die Voraussetzung, dass das Denkmal einen intellektuellen Wert für die Nachwelt haben muss. Man muss also in irgendeiner Weise aus diesem Werk lernen können. Das dritte Kriterium ist, dass das Werk von einer Zivilisation erschaffen wurde, die es heute nicht

9 Vgl. Hoffmann/Keller/Thomas/Caspary [2001], S. 8

10 Vgl. Deutsche UNESCO-Kommission e.V. [2016 b], o. S.

mehr gibt. Das vierte Kriterium besagt, dass das Denkmal stellvertretend für eine besondere Epoche der Menschheit stehen muss und auch in diese einzuordnen ist. Das fünfte Kriterium ist ganzen Dörfern oder Siedlungen zugeordnet, wenn diese exemplarisch für eine besondere Art und Weise der Bewirtschaftung eines Landstriches sind. Das sechste Kriterium befasst sich mit Ideen, die stellvertretend für eine Religion, Literatur, Kunst oder Epoche sind. All diese Kriterien unterliegen außerdem der Pflicht, dass sie einzigartig sein müssen. Dieses übergeordnete Kriterium hat den Sinn, dass keine Kopien von Werken, Stätten oder Denkmälern in die Liste aufgenommen werden.¹¹

Der Titel des Weltkulturerbes bringt Popularität für die entsprechende Stätte oder Naturlandschaft mit sich. Dies hat einerseits finanzielle Vorteile für die Orte, an denen die Werke stehen, bringt aber auch Umweltverschmutzung und Zerstörung mit sich. Das Geld, das von den Besuchern eines Weltkulturerbes eingebracht wird, kann genutzt werden, um die Pflege desselben zu finanzieren. Besonders kleine Städte, die nicht so bekannt sind, wie zum Beispiel Völklingen profitieren von dem Titel, da diese dadurch mehr Besucher anziehen. Der Kölner Dom und Dresden weisen gemeinsam jährlich ca. 9,8 Millionen Besucher auf. Hier sind die Auswirkungen des UNESCO-Titels kaum messbar. Örtlichkeiten, wie die Wieskirche, das Kloster Maulbronn oder die Grube Messel profitieren von dem Titel deutlich mehr.¹²

Aber der Titel bringt nicht allen Stätten nur Vorteile. Während die Brühler Schlösser in einem Jahr rund 80.000 neue Gäste aufweisen konnten und der Zeche Zollverein einen Anstieg der Besucherzahlen von ca. 36 Prozent vermelden, kann sich der Hohe Dom zu Aachen nicht so positiv äußern. Im Fall des Aachener Doms belaufen sich die Restaurierungskosten im Jahr auf rund 800.000 Euro, wenn man den Auflagen des Denkmalschutzes gerecht werden will.¹³ Insgesamt haben die Restaurierungsarbeiten für ihn über einen Zeitraum von 30 Jahren 37 Millionen Euro gekostet.¹⁴

Neben den Verschmutzungen, die der Tourismus bei den Kulturerbesstätten mit sich bringt gibt es noch weitere Punkte, die von Kritikern angesprochen werden, wenn die UNESCO-Liste diskutiert wird. Diese Kritiker behaupten, die Liste sei zu stark westlich

¹¹ Vgl. Caspary/Hoffmann/Keller/Thomas [2001], S. 9 f.

¹² Vgl. Hoos [2009], o.S.

¹³ Vgl. Traichel [2011], o. S.

¹⁴ Vgl. WDR [2016], o.S.

geprägt, da 54% der Stätten, die mit dem Titel ausgezeichnet wurden, sich in Europa befinden.¹⁵

2.3.3 Pflichten durch den Titel

Mit der Aufnahme in die Liste des Weltkulturerbes verpflichtet sind ein Land, für das entsprechende Kulturgut zu sorgen und für dessen Erhalt einzustehen. Sollte dennoch ein Schaden an dem Denkmal entstehen, muss dafür gesorgt werden, dass es so gut wie möglich wieder instand gesetzt wird. Gleichzeitig verpflichtet sich auch die UNESCO, für den Erhalt zu sorgen, sollte der Vertragspartner dazu selbst nicht in der Lage sein. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn das Kulturgut bedroht wird. Die UNESCO muss so lange für dessen Sicherheit sorgen, bis die Bedrohung vorüber ist, wenn das Land, in dem es sich befindet, dazu selbst nicht imstande ist. Damit die UNESCO dazu jederzeit und unmittelbar in der Lage ist, wurde ein Welterbefond eingerichtet, in den jedes Mitgliedsland Geld einfließen lässt. So sind im Notfall immer Mittel vorhanden, damit die UNESCO eingreifen kann.¹⁶

2.3.4 Konsequenzen bei Nichterfüllung der Pflichten

Im Fall des Kölner Doms müssen gewisse Anforderungen erfüllt werden. Es gibt seit Erhalt des Titels die Auflage, dass der freie Blick auf den Dom nicht behindert werden darf. 2004 wurde so zum Beispiel der Bau eines Hochhauses untersagt, das den Blick auf den Dom behindert hätte. Das Stadtbild hätte sich maßgeblich verändert. Der Titel wäre in diesem Fall aberkannt worden. Das zuständige Bauamt hat rechtzeitig eingegriffen. Die Auflagen, die die UNESCO den Titelträgern aufgibt, sind also nicht immer profitabel für diesen.¹⁷

Die UNESCO überprüft, ob sich die Staaten an die ihnen auferlegten Pflichten halten und tatsächlich dafür sorgen, dass das Kulturgut erhalten bleibt. Ist dies nicht der Fall, bekommt der betroffene Staat von der UNESCO die Gelegenheit, die Mängel zu beheben und dafür zu sorgen, dass das Kulturgut geschützt ist. Sollten die Auflagen immer noch nicht erfüllt werden, droht die Nichtaufnahme oder die Aberkennung des Titels. Da sich jedoch viele Staaten diesen Titel wünschen, da er ihnen Vorteile bringt, geben sie sich in der Regel große Mühe, ihn zu behalten. Das Ergebnis davon ist, dass viele

¹⁵ Vgl. Frey/Steiner [2010], o.S.

¹⁶ Vgl. Caspary/Hoffmann/Keller/Thomas [2001], S. 10 f.

¹⁷ Vgl. Traichel [2011], o. S.

Stätten und Denkmäler, die als Weltkulturerbe anerkannt sind, besser geschützt sind, als noch vor der Vergabe des Titels.¹⁸

2.4 Die Dombauhütte

Die Dombauhütte beschäftigt sich mit der Aufgabe des Erhalts des Kölner Doms. Dies ist durch die Größe des Kölner Doms und die besonderen Materialien und Gesteine die in diesem verarbeitet sind, eine besondere Herausforderung. Es erfordert stetiges Arbeiten und Restaurieren am Doms. Aus diesem Grund arbeiten ca. 60 Mitarbeiter der Dombauhütte daran, das Bauwerk zu erhalten. Zu den Mitarbeitern zählen Steinmetze und Bildhauer, die dafür Sorge tragen, dass die Skulpturen, die Innen- und Außenbereiche des Doms zu sehen sind restauriert werden. Wenn einzelne Figuren allerdings nicht mehr zu retten sind, werden sie gänzlich ersetzt.¹⁹

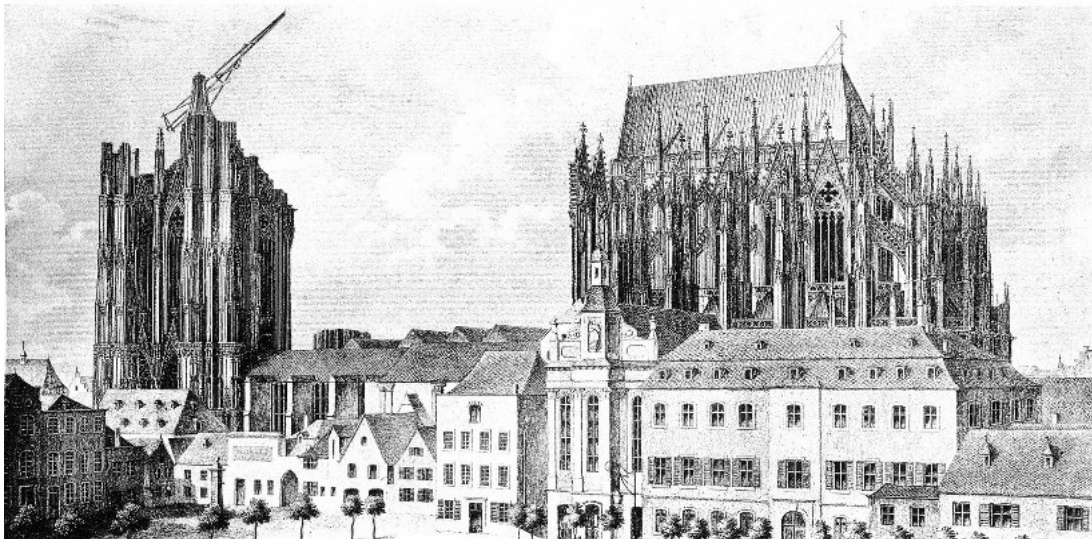


Abbildung 3: Der alte Kran (Quelle: Lehnen [ohne Jahr], o.S.)

Diese Aufgabe erledigt die Dombauhütte jedoch nicht erst seit Fertigstellung des Kölner Doms, sondern schon seit Anbeginn der Bauarbeiten im Mittelalter. Als der Bau des Doms das erste Mal 1560 eingestellt wurde, blieb die Funktion der Dombauhütte erhalten und die Mitarbeiter sorgten dafür, dass anfallende Reparaturarbeiten übernommen wurden. 1794 löste sich die Gruppe der Dombauhütte jedoch vorläufig auf, da die Stadt von den Franzosen besetzt wurde und die Einwohner und Mitarbeiter flohen. Sie wurde jedoch zurück ins Leben gerufen, als sich König Friedrich-Wilhelm IV. des Projekts des Kölner Doms wieder annahm. Seit 1842 ist die Dombauhütte wieder im Einsatz und hat dafür gesorgt, dass der alte Kran (Abb. 3), welcher an die 600 Jahre

¹⁸ Vgl. Caspary/Hoffmann/Keller/Thomas [2001], S. 11

¹⁹ Vgl. Dombau Köln [2016], o.S.

lang über dem Dom thronte, durch ein Gerüst ersetzt wurde, das heute noch an einem der Türme hängt. Der hölzerne Kran wurde bei Vollendung des Doms entfernt und zu Souvenirs verarbeitet.²⁰ Das heutige Gerüst des Kölner Doms ist am Nordturm befestigt. Ab einer Höhe von 100 Metern wurde es 2011 bis zu einer Höhe von 25 Metern von oben nach unten gebaut. Es dient dem Zweck, die Arbeiten der Steinmetze und Steinrestauratoren der Dombauhütte zu vereinfachen, indem es sichere Arbeit an der Fassade des Doms ermöglicht. Das Gerüst soll bis 2018 am Kölner Dom befristet bleiben.²¹ Seit Fertigstellung des Doms im Jahr 1880 kümmert sich die Dombauhütte allein um den Erhalt des Doms.²²

2.5 Der Zerfall des Kölner Doms

Die Unterstützer des Kölner Doms kämpfen jeden Tag mit dem Problem des Verfalls. Obwohl der Dom fertiggestellt wurde, ist er bis heute eine Baustelle. Es muss sowohl gegen Kriegsschäden vorgegangen werden als auch gegen die Einflüsse durch Luftverschmutzung und sauren Regen. Diese Umwelteinflüsse beschleunigen den Zerfall des Doms erheblich (Abb. 4 und 5).²³

Da in einzelnen Teilen des Doms bis zu acht verschiedene Sorten von Gestein verbaut sind, ist es für die Mitarbeiter der Dombauhütte eine besondere Herausforderung, für den Erhalt der Bausubstanz zu sorgen. Die unterschiedlichen Gesteine reagieren unterschiedlich auf die Einwirkung von Umwelteinflüssen. Einige der Steine bestehen zu großen Teilen aus Kalk und sind daher anfällig für sauren Regen. Das Gestein bekommt Risse²⁴ und wird vom Regen angegriffen.²⁵

Saurer Regen wird so genannt, weil er mit Stickstoffoxiden, Schwefeloxiden und anderen chemischen Stoffen angereichert ist, wodurch das Wasser sauer wird. Im Gegensatz zu herkömmlichem Regen hat er einen pH-Wert von 4,5. Normaler Regen hat einen pH-Wert von 5,5. Da saurer Regen durch Schadstoffe in der Luft verursacht wird, tritt er vermehrt in Ballungsgebieten mit Industrie auf. Die freigesetzten Gase reagieren hierbei in einer chemischen Reaktion mit den Wassermolekülen aus der Luft. Auf die Umgebung des Kölner Doms trifft dies zu. Der Regen greift nicht nur Pflanzen, sondern

²⁰ Vgl. Die Welt [2010], o.S

²¹ Vgl. express [2011], o.S

²² Vgl. Gummich/Buth [2016a], o.S.

²³ Vgl. Arens/Hoffmann/Keller/Thomas [2001], S. 133

²⁴ Vgl. Anlage 8

²⁵ Vgl. Gummich/Buth [2016b], o.S.



Abbildung 4: Schäden am Kölner Dom (Quelle: Claus [2016])



Abbildung 5: Schäden am Kölner Dom 2 (Quelle: Claus [2016])

auch Gesteine an. Besonders Mineralien wie Kalium, Magnesium oder Calcium werden vom sauren Niederschlag beeinträchtigt. Da einige der Gesteinsorten, die im Kölner Dom verbaut sind, Calcium enthalten, wird er an diesen Stellen besonders durch die Umwelteinflüsse beansprucht.²⁶

Welche Einwirkungen die Umwelt auf den Kölner Dom hat, zeigt sich auch an dessen Farbe. Das Gestein des Doms ist im ursprünglichen oder gesäuberten Zustand weiß.

²⁶ Vgl. AG-Umwelt [2016], o.S.

Der Dom erscheint aufgrund der Verschmutzung der Luft in einer schwarzen Patina (Wortherkunft: ital. „patina“=Rost, Edelrost). Trotz regelmäßigen Reinigens des Gesteins (Abb. 6) ist diese zu erkennen, da die Einflüsse der verschmutzten Umwelt ständig auf den Dom einwirken.²⁷



Abbildung 6: Gefärbtes Gestein bei der Säuberung (Quelle: Claus [2016])

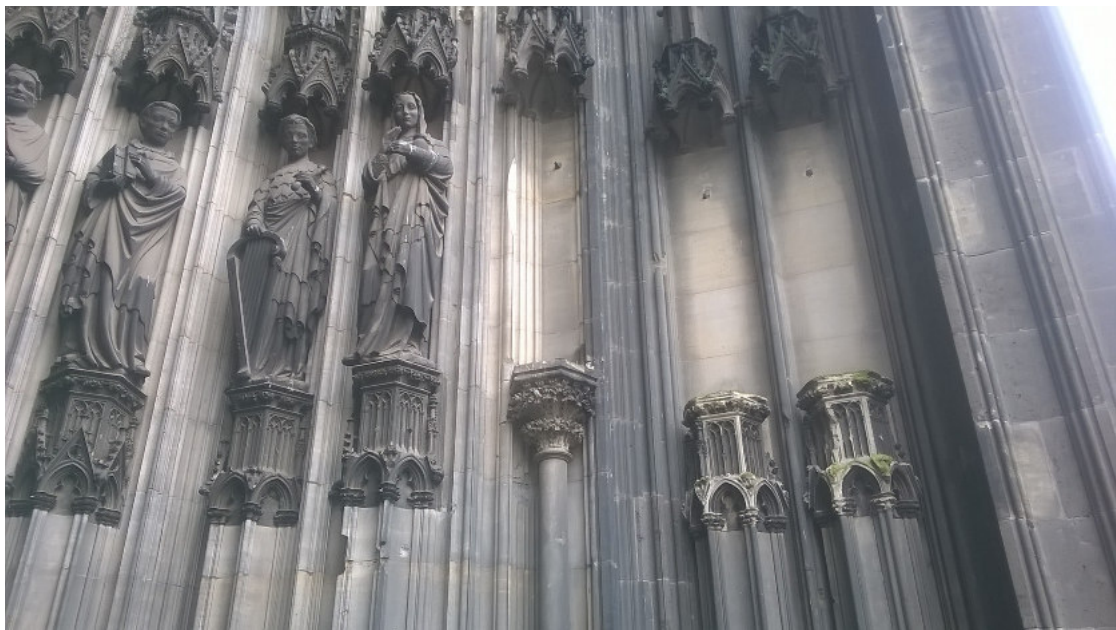


Abbildung 7: Fehlende Figuren am Kölner Dom (Quelle: Eigene Darstellung)

27 Vgl. Claus [2016]

3 Zoller und Fröhlich

Die Zoller und Fröhlich GmbH (Z+F) wurde im Jahre 1963 von Hans Fröhlich und Hans Zoller gegründet und bietet seinen Kunden unter anderem Laserscanner, mit denen man Gebäude jeder Größe einscannen kann. Das Unternehmen hat seinen Hauptsitz in Wangen am Allgäu, Deutschland. Weitere Niederlassungen sind seit 1998 in Pittsburgh (USA), seit 2001 in Manchester (UK) und seit 2013 in Cusago-Mailand (Italien). Das Unternehmen hat sich auf Elektrotechnik spezialisiert hat und Kooperationspartner in über 40 Ländern.²⁸

Das Leitbild der Firma ist die Innovationsfähigkeit und Genauigkeit des Unternehmens. Diese Charakterzüge sind nach eigener Aussage die Grundlage für dessen Erfolg. Das Unternehmen habe es sich bereits bei der Gründung zur Aufgabe gemacht, innovativ zu sein und neue Techniken zu entwickeln. Das Geheimnis ihres Erfolges sei es, stetig neue Güter auf den Markt bringen zu können und somit ihren Kunden immer etwas neues zu bieten. Um dies garantieren zu können, brauche man befähigte Mitarbeiter, die das Unternehmen durch ihre Kompetenzen voranbringen. Nur so könne man die hochgesteckten Ziele des Unternehmens erfüllen.²⁹

Die Firma Zoller und Fröhlich ist in das Projekt des Domscans involviert, da die Scanner, die zum Durchführen der Unternehmung genutzt wurden, von dieser Marke stammen. Christoph Held war als Stellvertreter der Firma während der gesamten Phase des Scannens vor Ort und brachte einen der beiden Scanner, die benutzt wurden, mit. Sie wurden von Professor Douglas Pritchard, dem technischen Leiter des Projektes, gegeben, das Projekt des Domscannens zu unterstützen. Die Firma war nach eigener Angabe „begeistert von der Idee“ und sagte zu, bei dem Projekt zu helfen.³⁰

4 Die Technologie

Für das Erfassen des Kölner Doms in 3D wurden zwei Laserscanner der Firma Zoller und Fröhlich GmbH eingesetzt. Der Z+F IMAGER® 5010C und der IMAGER® 5010X wurden in gleichem Umfang verwendet. Beide Scanner bedienen sich der Point-Cloud-Technologie, die es ermöglicht, Gebäude wie den Kölner Dom in 3D mit einer Genauig-

²⁸ Vgl. Zoller + Fröhlich GmbH [2016 a], o. S.

²⁹ Vgl. Zoller + Fröhlich GmbH [2016 b], o. S.

³⁰ Vgl. Christoph Held, Anlage 2

keit von maximal drei Millimetern Abweichung einzuscannen. Die beiden Laserscanner Z+F IMAGER® 5010C und Z+F IMAGER® 5010X sind mit ihrer Geschwindigkeit die schnellsten Laserscanner auf dem Markt.³¹

4.1 Z+F IMAGER® 5010C

Das „C“ im Namen steht für „Camera“, da dieser Scanner der erste von Z+F ist, welcher eine integrierte HDR Kamera besitzt. Diese Kamera ermöglicht es, nicht nur die Strukturen der Objekte, sondern auch HDR-Bilder aufzunehmen. Somit wird keine Aufnahme zu hell oder zu dunkel.³²

Der Z+F IMAGER® 5010C (Abb. 8) kann problemlos an öffentlichen Orten eingesetzt werden. Er ist einfach zu bedienen, hat kurze Scanzeiten und ist gemäß Laserklasse 1 klassifiziert. Die Reichweite des Scanners erstreckt sich in einem Radius von maximal 187 Metern und er hat eine Messrate von 1 Mio. Punkten pro Sekunde. Zusammen mit der HDR-Kamera erzeugt der Scanner 3D-Bilder mit einer Genauigkeit von maximal drei Millimetern Abweichung bei einem Gebäude von der Größe des Kölner Doms. Der Scanner ist durch die Kamera auch in der Lage, Bilder mit exakten Farbinformationen darzustellen.³³

Seine Position erkennt der Scanner mithilfe von sogenannten Target-Points. Die Punkte werden vom Scanner registriert, definieren den Standort und vereinfachen das spätere Zusammenfügen der Scandaten. Diese Referenzpunkte werden in der Regel auf dem Boden unter dem Scanner eingezeichnet und von ihm vor Beginn des Scanvorgangs erfasst.³⁴



Abbildung 8: Z+F IMAGER® 5010C (Quelle: 4GEO [ohne Jahr], o.S.)

³¹ Vgl. Geo Science SA [ohne Jahr], o.S.

³² Vgl. Billingsley [2016], o. S.

³³ Vgl. Zoller + Fröhlich GmbH [2016 d], S. 3

³⁴ Vgl. Zogg [2016], S.11 ff.

Zudem hat der Scanner ein thermografisches Messsystem integriert. Jedoch beschäftigt sich dieses System nicht mit dem Kontrastumfang der Umgebung, sondern mit den thermografischen Besonderheiten der Umgebung. Im speziellen Fall des Kölner Doms wird erfasst, ob im Gestein Wasser eingeschlossen ist, das Schäden verursachen könnte. Genauso erkennt das System, ob es Wärmebrücken gibt, die das Gestein beeinflussen können. Dies funktioniert ähnlich wie die HDR-Kamera-Technik und wird im Anschluss an das Scannen in der Nachbearbeitung mit dem 3D-Bild kombiniert.³⁵

4.2 Z+F IMAGER® 5010X

Der Z+F IMAGER® 5010X ist das Nachfolgemodell des Z+F IMAGER® 5010C und verfügt über die selbe Reichweite von bis zu 187 Metern. Darüber hinaus hat er ebenfalls einen vertikalen Sichtbereich von 320° und einen horizontalen Sichtbereich von 360°. Auch er nimmt bis zu 1 Million Pixel pro Sekunde auf und hat eine integrierte HDR Kamera. Der Unterschied zum Vorgänger ist, dass der Z+F IMAGER® 5010X ein neues Navigationssystem integriert hat, mit dem er selbstständig seinen Standort feststellen kann. Bei Scans im Freien ermittelt er seine Position mithilfe von GPS-Daten. Für Scanvorgänge im Inneren von Gebäuden hat er zudem neue Sensoren integriert, mit denen er, besser als sein Vorgänger, seine Position bestimmen kann.³⁶

Dies hat gegenüber seinem Vorgänger dem Z+F IMAGER® 5010C den Vorteil, dass die Punktwolken, die beim Scannen entstehen, später leichter zusammengefügt werden können. Beim Vorgängermodell hatte man das Problem, dass der Scanner bei fehlerhaftem Einrichten nicht eindeutig sagen konnte, wo er sich befand. Wenn die Person, die ihn bediente also einen Fehler machte, weil die Targets fehlerhaft erfasst oder es gar vergessen wurde diese zu scannen, konnte man nur mühsam in der Nachbearbeitung den Standort der Scandaten ermitteln. Wenn die Überschchnittfläche der Punktwolken zudem nicht groß genug war, gab es ebenfalls Probleme. Mit dem Z+F IMAGER® 5010X wird der Faktor des menschlichen Versagens stark reduziert. Dieser Scanner synchronisiert seine Position während des Scanvorgangs automatisch mithilfe vom Z+F Laser Controll® Scout. Hierzu ist es ratsam ein Tablet während des Vorgangs des Scannens bei sich zu haben, weil man direkt nach dem Scannen die Daten überprüfen kann.³⁷ Die Position muss nicht nachträglich eingefügt werden, sondern die Software setzt die Scans von alleine zusammen. Wenn diese automatische Registrie-

³⁵ Vgl. Claus [2016]

³⁶ Vgl. Geo Science SA [ohne Jahr], o.S.

³⁷ Vgl. Christoph Held, Anlage 2

rung nicht möglich sein sollte, bietet das Programm auch an, den Punkt (Target) manuell einzugeben.³⁸

4.2.1 Bauart

Der Z+F IMAGER® 5010C und der Z+F IMAGER® 5010X werden als Panorama-Scanner klassifiziert. Im Gegensatz zu Kamera-Scannern, die nur ein begrenztes Sichtfeld aufnehmen können, und Hybrid-Scannern, die horizontal in einem 360° Winkel aufnehmen können, erfasst ein Panorama-Scanner durch Rotation das gesamte vertikale und horizontale Spektrum um ihn herum. Kamera-Scanner rotieren nicht und erfassen lediglich die Objekte in ihrem unmittelbaren Sichtfeld. Hybrid-Scanner rotieren um die eigene Achse, erfassen ihre Umgebung aber nicht in einem vertikal ausgerichteten 360° Winkel, wie der Panorama-Scanner es tut (Abb. 9).³⁹

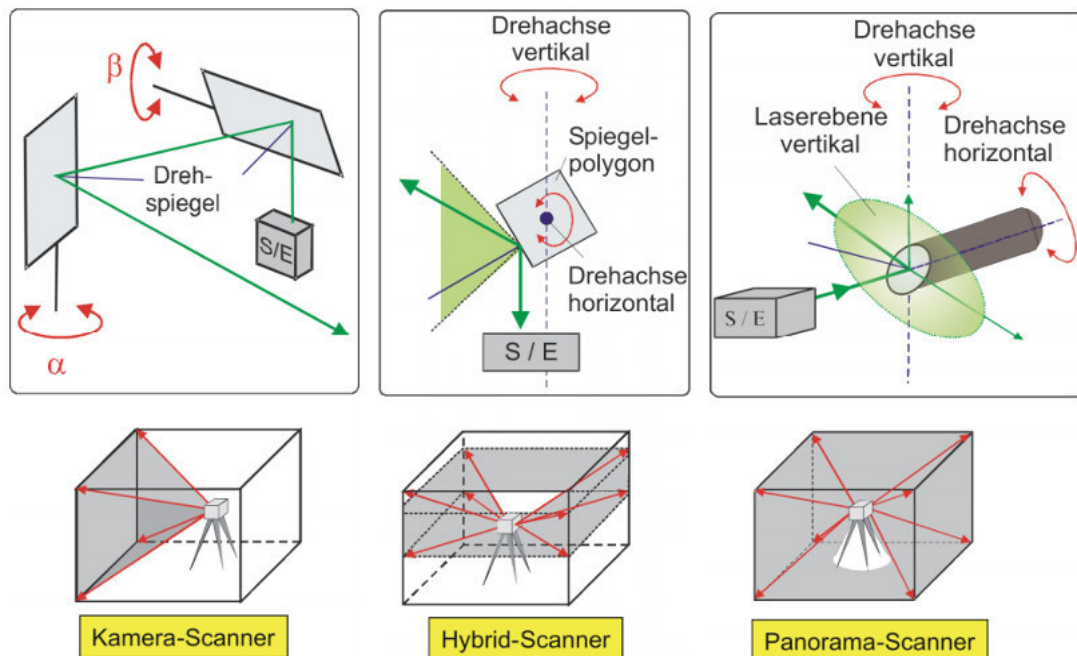


Abbildung 9: Klassifizierungen von Laserscannern (Quelle: Staiger [2007] S.4 ff.)

4.2.2 Reichweite

Der Z+F IMAGER® 5010C hat ein Sichtfeld, welches sich vertikal auf 320° und horizontal auf 360° erstreckt. Bis auf einen kleinen Bereich unter sich, auf dem sein Stativ steht, kann er seine gesamte Umgebung um sich herum erfassen und einscannen. Sei-

³⁸ Vgl. Zoller + Fröhlich GmbH [2016 f], S.1 ff.

³⁹ Vgl. Staiger [2007], S.4

ne Reichweite bewegt sich dabei in einem Radius zwischen 0,3m und 187m, in dem er alles in gleich guter Auflösung aufnehmen kann.⁴⁰

4.2.3 High Dynamic Range

HDR-Technologie wird dann gebraucht, wenn man einen Bereich darstellen möchte, der sowohl stark unterbelichtete als auch stark überbelichtete Stellen aufweist. Wenn man versucht einen Ort mit einem hohen Kontrastumfang zu fotografieren, steht man mit einer Kamera, die über keine HDR-Funktion verfügt, vor dem Problem, dass die Kamera nicht über genug Dynamikumfang verfügt, um alle Graustufen zwischen den sehr hellen und den dunklen Punkten, darzustellen.

Mit einer HDR-Kamera werden die Motive absichtlich mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommen (Abb. 10). Es wird eine Serie von Bildern erstellt. Diese entstehen in sehr kurzen Abständen zwischen einander. Es werden einerseits Bilder erzeugt, die sehr stark überbelichtet sind und andererseits solche, die sehr stark unterbelichtet sind. Dies wird gemacht, damit der Kontrastumfang im vollen Maße erfasst werden kann. Anschließend werden diese Bilder zu einem einzigen zusammengefügt und man erhält eine hochauflösende Darstellung, welche keine über- oder unterbelichteten Stellen aufweist (Abb. 11).

Wenn man ein HDR-Bild selbst erzeugen möchte, muss man dafür sorgen, dass der Bildausschnitt bei jedem Bild gleich bleibt und sich nicht verändert. Hierfür empfiehlt sich der Einsatz eines Stativs, da dieses der Kamera Stabilität gibt. Zudem wird empfohlen, bei dem Erstellen solcher Bilder die Zeitautomatik zu aktivieren. Wenn man mehrere Einzelbilder erzeugt, sollte man die Einstellungen der Blende nicht verändern, da sich dadurch die Tiefenschärfe verändert und es beim Zusammenfügen der Bilder zu Unschärfe kommt. Zudem wird es empfohlen, die Bilder mit Matrixmessung (oder Mehrfachfeldmessung) zu schießen. Auf diese Weise wird automatisch erfasst, welche Helligkeitsverhältnisse in welchen Teilen des Bildes vorliegen, da das Bild in mehrere Messfelder unterteilt wird und die Belichtung des Bildes errechnet wird.⁴¹ Dies ist wichtig, wenn man möchte, dass das Ergebnis optimal belichtet ist. Zudem dürfen die Blitzfunktion und die Auto-ISO-Funktion bei dem Erstellen von HDR-Aufnahmen nicht aktiviert sein. Diese Funktionen würden die Licht- und Kontrastverhältnisse verfälschen. Der ISO-Wert beeinflusst die Empfindlichkeit der Kamera. Hierbei sorgt ein geringer ISO-Wert für eine niedrige Lichtempfindlichkeit und das Bild erscheint dunkler, wäh-

⁴⁰ Vgl. Laserscanning Europe [2016], o.S.

⁴¹ Vgl. Photab [ohne Jahr], o.S.

rend ein hoher ISO-Wert das Bild heller erscheinen lässt. Welche Werte gebraucht werden, hängt von der Situation ab. So kann an sonnigen Tagen problemlos mit einem niedrigen ISO-Wert gearbeitet werden, während man an Orten mit schlechten Lichtverhältnissen einen höheren wählen sollte.⁴²



Abbildung 10: Über- und Unterbelichtete Bilder (Quelle: Claus [2016])



Abbildung 11: Fertiges HDR-Bild (Quelle: Claus [2016])

HDR kann sowohl von der Kamera selber erzeugt werden als auch in der Nachbearbeitung durch eine Software. In der Nachbearbeitung benötigt man mindestens drei Bilder, die alle unterschiedliche Kontrastumfänge haben. Diese werden in einem Bildbearbeitungsprogramm zusammengefügt und man erhält das qualitativ hochwertige Ergebnis mit einem hohen Kontrastumfang. Zu den gängigsten Programmen, die man benutzen kann, um solche Bilder zu erzeugen, gehören Adobe Photoshop und Photomatix. Aller-

42 Vgl. richtig-fotografiert [ohne Jahr], o.S

dings werden sowohl für die Erzeugung der Bilder, als auch für die Bearbeitung Grundkenntnis in der Bildbearbeitung vorausgesetzt.⁴³

Dieser Vorgang musste vor dem Erscheinen Z+F IMAGER® 5010C manuell erledigt werden. Jetzt erledigt der Scanner diese Schritte von alleine ohne dass eingegriffen werden müsste. Hierzu bedient er sich dem Z+F SmartLight. Dies hat den Vorteil, dass der Benutzer des Scanners keine Vorkenntnisse in der Bearbeitung von Photos mitbringen muss um die HDR-Kamera zu bedienen. Auch muss der Nutzer nicht wissen, welche Blende oder Belichtungszeit er wann einsetzen muss um ein Bild in HDR-Qualität zu bekommen. Dieser Vorgang geschieht unabhängig von der Aufnahme der Punktwolken des Scanners. Die Kamera am Scanner muss vor Beginn des Scannens nur eingeschaltet werden und der Scanner vereint die Daten dann mit den Punktwolken, die wie herkömmlich aufgezeichnet werden.⁴⁴

4.2.4 Laserklassen

Es gibt die Laserklassen aufsteigend von 1 über 1M, 2, 2M, 3R, 3B bis 4. Je höher die Klassifizierung ist, desto gefährlicher ist der Laser für den Menschen, der mit ihm in Kontakt kommt. Mit besonderer Vorsicht muss der Kontakt zur Netzhaut vermieden werden, da Laser mit einer höheren Klassifizierung zu Verbrennungen führen können. Bei Betroffenen kann dies zu Einschränkungen der Sehkraft führen.

Der Scanner Z+F IMAGER® 5010C ist gemäß Laserklasse 1 klassifiziert. Dies bedeutet, dass die Benutzung des Laserscanners für Menschen im Anwendungsbereich nicht schädlich ist und dieser in der Öffentlichkeit ohne Bedenken genutzt werden kann. Auch bei längerem Einwirken auf die Augen entstehen keine Schäden an der Netzhaut. Andere Produkte, die mit der Laserklasse 1 klassifiziert sind, sind Produkte, die im alltäglichen Haushalt vorkommen und von Personen ohne weitere Kenntnisse problemlos verwendet werden können. Dazu zählen zum Beispiel Laser in CD-Playern, Laserdruckern oder Büro-Scannern.

Laserklasse 1 ist die einzige Klassifizierung, die keine Probleme für den Menschen darstellt. Die Laserklasse 2 stellt im Vergleich dazu noch bis zu einer Bestrahlungsdauer von unter 0,25 Sekunden kein Problem für die Netzhaut dar. Zur Laserklasse 2 zählen im Alltag vorkommende Geräte, wie zum Beispiel Lichtschranken oder Laserpointer. Die Laserklasse 4 hingegen ist nicht nur für das Auge, sondern auch für die Haut

⁴³ Vgl. Nikon [2016], o. S.

⁴⁴ Vgl. Zoller + Fröhlich GmbH [2016 c], S. 4

des Bestrahlten gefährlich und kann zu Verbrennungen führen. Zu den Lasern der Klasse 4 zählen vor allem Forschungslaser und Laser für medizinische Anwendungen, die nicht für die Öffentlichkeit zugänglich sind.⁴⁵

4.3 Andere Scanner und Anwendungsbereiche

Neben dem Z+F IMAGER® 5010C und dem Z+F IMAGER® 5010X gibt es noch andere Scanner der Marke Z+F. Während die vorangegangenen Scanner für die Anwendung am Boden eingesetzt werden können, gibt es Scanner, die sich auf die Aufnahmen unter Wasser spezialisiert haben.

Einige dieser Scanner werden zudem in gefährlichen Umgebungen, wie zum Beispiel bei Bohrinseln, eingesetzt. Der einzige Scanner, der explosionsgeschützt in einer solchen Umgebung scannen kann, ist der Z+F IMAGER® 5006EX. Dieser Scanner wurde zum Beispiel für 3D-Aufnahmen im dänischen Teil der Nordsee auf der Tyra-East-Plattform genutzt, da beim Bohren nach Erdöl und Erdgasen leicht entflammbare Gase entweichen können und deshalb ein explosionsgeschützter Scanner verwendet werden musste.⁴⁶

Die Scanner der Marke Z+F werden nicht nur zum Erfassen von Gebäuden und Gelände genutzt. Aufgrund der integrierten HDR-Kamera wird der Z+F IMAGER® 5010X auch vom bayrischen Landeskriminalamt an Tatorten verwendet. Die Tatorte werden von diesem Scanner in 3D eingescannt und man erhält ein 3D-Abbild des Raumes. Der Vorteil bei dieser Methode ist, dass der gesamte Raum oder eine ganze Wohnung originalgetreu ohne subjektive Verfälschung dokumentiert wird. Würde ein Ermittler sich nur auf Fotos beschränken, wäre nur seine subjektive Wahrnehmung dokumentiert und es entstünden eventuelle Verfälschungen, da er möglicherweise etwas ausgelassen haben könnte. Zudem hat man mit den Aufnahmen des Laserscanners eine sehr hohe Auflösung und kann auch kleinste Details gut erkennen. Außerdem kann der digital aufgenommene Raum am Computer „betreten“ werden und die Ermittler haben die Möglichkeit, sich auch im Nachhinein den Tatort aus verschiedene Blickwinkeln anzusehen. Es können Schusswinkel nachverfolgt oder ermittelt werden. Blutspritzer können in 3D analysiert werden, was den Vorteil hat, dass man untersuchen kann, aus welchem Winkel sie aufgetroffen sind und aus welcher Entfernung sie stammen. Man

45 Vgl. Udovicic [2010], S.13 ff.

46 Vgl. Zoller + Fröhlich GmbH [2016 e], S.2 ff.

bekommt Einblicke in die Größe eines Täters und kann den Tatvorgang besser rekonstruieren.⁴⁷

Im Jahre 2006 wurde bereits Laserscantechnik zu einem ähnlichen Zweck eingesetzt, wie es heute beim Kölner Dom der Fall ist. Es sollte verglichen werden, ob drei unterschiedliche Wachsfigurenreliefs, welche auf das Münchener Stadtmuseum, das bayrische Nationalmuseum und die Theatinerkirche in München verteilt waren, eine gemeinsame Herkunft haben. Diese drei Werke weisen Ähnlichkeiten in bestimmten Bereichen des Körpers auf, weshalb vermutet wurde, dass sie am selben Ort mit den selben Gussformen hergestellt wurden. Da die Figuren zu filigran sind, um mit bloßem Auge verglichen zu werden, wurde sich der Technik des Laserscannens bedient. Es wurden von allen drei Werken Scanndaten ermittelt, die untersucht und verglichen wurden. Eine gemeinsame Herkunft konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden. Diese eindeutige Erkenntnis hätte sich ohne den Einsatz von 3D-Scannern nicht ergeben.⁴⁸

5 Terrestrisches Laserscanning

Unter 3D-Laserscanning versteht man den Vorgang, zur digitalen Erfassung von Oberflächen von Gebäuden, Gegenständen, Naturebenen und sonstigen Flächen. Hierbei wird ein Scanner verwendet, der mithilfe eines Lasers und eines Spiegels in kurzen Intervallen Licht von sich schießt und anhand des Zeitpunkts des Eintreffens der Reflektion die Entfernung zu der Fläche misst, die visualisiert werden soll. Bei diesem Vorgang entstehen sogenannte Punktwolken, mit welchen später ein 3D-Modell erzeugt werden kann.⁴⁹

Seit Ende der 1990er Jahre wird eine Methode im Vermessungswesen angewendet, die sich terrestrisches Laserscanning (TLS) nennt. Scanner, die sich dieser Technologie bedienen können in einer Entfernung von bis zu einem Kilometer scannen. Heute gibt es viele Einsatzmöglichkeiten für solche Scanner. Die Scanner, die beim Scannen des Kölner Doms zur fotografischen Dokumentation eingesetzt wurden, bedienen sich dieser Technologie.

47 Vgl. Zoller + Fröhlich GmbH [2016 g], S.2. ff.

48 Eis/Eikermann [2006], S.31 ff.

49 Vgl. Absolute Geometries [2009], o.S.

Das TLS ist automatisiert und arbeitet weitgehend von alleine. Der Scanner wird auf einem Laserscanpunkt platziert, von dem aus er in einem Radius von 360° alles in seiner Umgebung erfasst. Der Scanner sammelt die Informationen aller Oberflächen um ihn herum, in dem er sie mit einem Laser beschießt und die durch die Punktwolkentechnologie gesammelten Messpunkte so verbindet, dass man bereits ein erstes Schema der Umgebung erkennen kann.

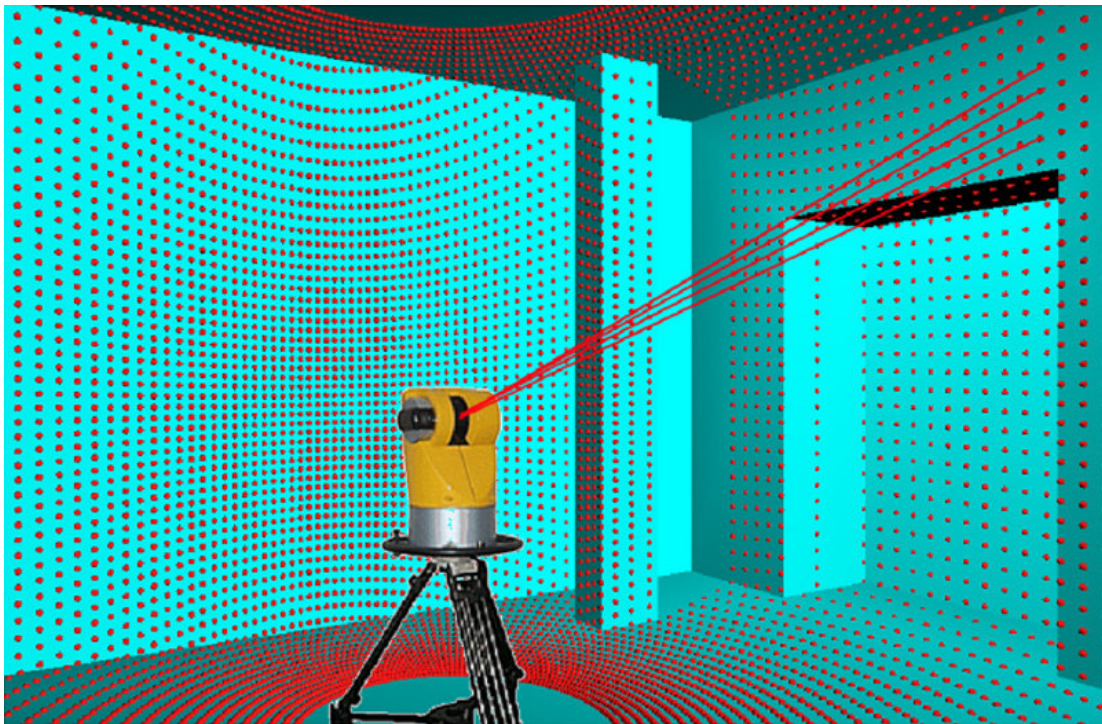


Abbildung 12: Darstellung der Abmessung des Laserscanners (Quelle: Akademie der Wissenschaften und der Literatur [2016] o.S.)

Vorteile sind hierbei, dass ein Scanner, der sich dieser Methode bedient, im Maßstab 1:1 messen kann und die Daten, die daraus gewonnen werden können, entsprechend genau sind. Daraus ergibt sich, dass die Daten objektiv sind und es keinen Spielraum durch Interpretationen oder Missverständnisse geben kann. Da der Scanner bis zu eine Million Punkte pro Sekunde erzeugen kann, arbeitet er entsprechend schnell. Hierbei gilt jedoch: Je schneller ein Scanner rotieren soll, desto weniger Punkte werden gescannt und umso ungenauer werden die erfassten Daten. Stellt man hingegen ein, dass die Punkte untereinander einen geringen Abstand haben sollen, ist die Auflösung sehr hoch, die Rotationsgeschwindigkeit aber reduziert. So sind die Daten, die vom Kölner Dom erzeugt wurden so genau, dass sie eine Abweichung von maximal 3 Millimetern haben. Mit Lasern erfasste Scandaten sind nicht abhängig von den Lichtsensitiven, die zum Außstoßzeitpunkt des Scannens herrschen (Abb. 12). Zusammen mit ei-

ner HDR-Kamera können in der Nachbearbeitung hochauflösende 1:1 Bilder generiert werden, die zudem die Farbe des Originals zeigen.

Obwohl die Methode des terrestrischen Laserscannings viele Vorteile aufweist, gibt es auch einige Nachteile, die beim Erstellen der Daten auftreten. Der Scanner darf während des Scannens nicht bewegt werden und muss sicher und fest stehen. Der kleinste Stoß oder Wackler verfälscht das Ergebnis. Zudem sind die Farbinformationen, obwohl man sie zwar sehr genau erfassen kann, nicht direkt vor Ort abrufbar. Während man sich direkt nach dem Scan auf einem mobilen Gerät die Punktwolken sofort ansehen kann, kann man dies mit den Farbaufnahmen nicht. Das gelingt erst in der Nachbearbeitung, in der man die Daten zusammenfügt. Diese beiden genannten Punkte führen zum nächsten Nachteil. Die Nachbearbeitung der Daten kann vor allem bei großen und komplexen Gebäuden sehr lange dauern und aufwändig sein.⁵⁰

Der Ablauf des Scannens unterteilt sich in drei Phasen: die Aufnahme, die Registrierung und die Auswertung. In der Phase der Aufnahme sollte man zunächst überlegen, welcher Scanner für den entsprechenden Zweck geeignet ist. Wenn das geschehen ist, wählt man die Messpunkte, auf denen der Scanner platziert wird, und von denen aus er scannt. Da der Scanner nur die für ihn „sichtbare“ Umgebung scannen kann, muss er nacheinander auf mehreren Standorten platziert werden. Der nächste Schritt ist der eigentliche Scan des Objektes oder der Umgebung, die zu scannen ist. Hierbei ist eine Auflösung zu wählen, die dem Zweck angemessen ist. Im Anschluss werden die Bilder noch mit einer integrierten Kamera aufgenommen, damit die visualisierten Daten im späteren Verlauf die richtige Farbe erhalten.

Die dritte Phase ist die Registrierung. Diese ist wichtig, da der Scanner von unterschiedlichen Standpunkten aus scannt. Damit diese Daten später ohne Probleme zusammengefügt werden können, muss sichergestellt werden, dass man weiß, welcher Scan wo stattgefunden hat. Hierfür kann man Referenzpunkte benutzen, welche auf dem Boden eingezeichnet werden. Der Scanner erkennt diese Punkte (Targets) und rechnet so seine Position aus. Eine andere Möglichkeit ist es, Referenzobjekte zu benutzen, wie zum Beispiel Kugeln, Kegel oder Zylinder, die vom Scanner erfasst werden. Die dritte Möglichkeit ist es, die Punktwolken der Scanner überlappen zu lassen.

In der letzten Phase, also in der Auswertung, werden die Daten zusammengefügt und es wird überprüft, ob die Scandaten vollständig sind. Sollte es zu „Lücken“ in den Datensätzen gekommen sein, sollte man nach Möglichkeit einen neuen Scan ansetz-

50 Vgl. Akademie der Wissenschaften und der Literatur [2016], o.S.

ten. Zudem kann man etwaige Fehlmessungen ausbessern. Im Anschluss werden die Scandaten für den Zweck eingesetzt, für den sie erstellt wurden.⁵¹

5.1 Punktwolken

Der Begriff Punktwolke beschreibt die Zusammenfassung der beim Vorgang des 3D-Laserscannens erhaltenen Einzeldaten (Punkte). Die Punkte, aus denen sich die Punktwolke zusammensetzt, sind allesamt XYZ-Koordinaten, die die Position der vorher vermessenen Oberfläche im Raum zeigen. Aus wie vielen Punkten eine Punktwolke besteht, ist abhängig davon, wie groß das gewünschte Objekt ist, und wie hoch die vorher eingestellte Genauigkeit des Scans ist.⁵²

Es handelt sich also um eine Ansammlung von Messdaten in Form von Punkten in einem multidimensionalen Raum. Diese fügen sich zu einem dreidimensionalen Polygonmodell zusammen. Das Objekt wird mit originalgetreuer Oberflächenstruktur und Farbe dargestellt (Abb. 13). Man erhält Punktwolken jedoch nicht nur durch den Gebrauch eines 3D-Laserscanners. Sie können auch künstlich am Computer generiert werden, um 3D-Modelle darzustellen.⁵³



Abbildung 13: 3D-Scan (ohne Texturen) im Vergleich zum Original (Quelle: Claus [2016])

⁵¹ Vgl. Zogg [2016], S.11 ff.

⁵² Vgl. Trigon Art [ohne Jahr], o.S.

⁵³ Vgl. Rusu/Cousins [2011], o.S.

Zu den Programmen, die man für die Bearbeitung von Punktwolken benutzen kann, zählen *Bentley Pointools*, *Autodesk ReCap*, *Trimble Realworks*, *Leica Cyclone* und *Z+F Laser Control*.⁵⁴ Auf diese wird in einem späteren Kapitel näher eingegangen. Allgemein erlauben diese Programme Computer Aided Design (CAD). Darunter versteht man nach Definition das Gestalten von Produkten und Objekten auf grafischer Ebene mit Zuhilfenahme eines Computers. Dies kann sowohl auf zweidimensionaler (2D-Geometrie-System) als auch auf dreidimensionaler Ebene (3D-Geometrie-System) geschehen.⁵⁵ In der Regel wird diese Technik von Architekten, Ingenieuren oder Künstlern benutzt. Diese erstellen sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Konstruktionszeichnungen und Modelle für unterschiedliche Zwecke.⁵⁶

6 Warum 3D-Visualisierung?

Obgleich die Visualisierung eines Objektes Schwierigkeiten mit sich bringt, hat diese Methode einige Vorteile gegenüber der 2D-Visualisierung. So kann zum Beispiel das entsprechende Objekt von allen Seiten und aus unterschiedlichen Winkeln genau betrachtet werden. Bei der 2D-Visualisierung hat man diese Möglichkeit nicht oder nur eingeschränkt. Weitere Vorteile, die für den Einsatz einer 3D-Visualisierung sprechen, bestehen darin, dass man mit den Daten interagieren kann und somit eventuell problematische Bereiche genau beleuchtet werden können. Das Objekt kann viel genauer analysiert werden.⁵⁷

In der Anwendung auf den Kölner Dom bedeutet dies, dass die Dombauhütte nach Erhalt der Daten den Kölner Dom sehr genau untersuchen kann. Es kann festgestellt werden, welche Stellen am Dom besonders restaurierungsbedürftig sind, da durch eine Analyse der Struktur des Gesteins die Stabilität von diesen ermittelt werden kann. Es kann ermittelt werden, ob es Stellen gibt, an denen das Gestein besonders Hitze oder Nässe ausgesetzt ist. Wenn man in ein paar Jahren ein weiteres Mal den Dom scannen sollte und diese Daten anschließend auswertet, könnte man sie mit den heutigen Daten vergleichen. Daraus könnten Erkenntnisse gezogen werden, ob es in den dazwischen liegenden Jahren Veränderungen gab, die mit dem bloßen Auge nicht sichtbar sind.

⁵⁴ Vgl. Professor Dounglas Pritchard, Anlage 1

⁵⁵ Vgl. Springer Gabler [ohne Jahr], o.S.

⁵⁶ Vgl. Rouse [2011], o.S.

⁵⁷ Vgl. Mach [2000], S.17

So ließe sich zum Beispiel sagen, ob sich die Wände des Doms bewegt haben, ob sich bestehende Risse verändert haben oder ob neue entstanden sind. Auf diese Weise könnte man über Jahrzehnte hinweg immer wieder Vergleiche aufstellen und die Entwicklung des Gebäudes beobachten. Dies hilft, besonders anfällige Stellen zu erkennen und darauf zu reagieren.⁵⁸

Auch wenn in Zukunft Schäden durch äußere Einwirkungen auftreten sollten, wie zum Beispiel durch zukünftige Naturkatastrophen oder Kriege, ist der heute Zustand des Kölner Doms für die Nachwelt digital erhalten. Sollten zum Beispiel durch Umwelteinflüsse Figuren an der Außenseite des Doms nicht mehr zu reparieren sein, könnten sie mithilfe der heutigen Daten wiederhergestellt werden. Sollte der schlimmste Fall eintreten und der Dom teilweise oder gänzlich zerstört werden, hat man jetzt die Möglichkeit, auf die Daten zurückzugreifen und ihn originalgetreu zu rekonstruieren.

Durch das 3D-Scannen wird einerseits die Restaurierung unterstützt und andererseits der Dom für die Nachwelt erhalten. Der Kölner Dom stellt hierbei durch seine Größe und verwinkelte Architektur eine Herausforderung dar. Seine historische Vergangenheit und seine einmaligen Bauelemente machen ihn jedoch einzigartig.

7 Der Kölner Dom in 3D

Im Jahr 2015 wurde der Kölner Dom mit den beiden Scannern der Marke Zoller und Fröhlich in 3D eingescannt. Der Vorgang erstreckte sich über einen Zeitraum von drei Wochen und hat Daten hervorgebracht, die eine maximale Abweichung von 3 Millimetern aufweisen. Durchgeführt wurde das Projekt von der Hochschule Fresenius unter der technischen Leitung der School of Energy, Geoscience, Infrastructure und Society, der Heriot-Watt University, Edinburgh. Die Stadt Köln hat das Projekt in der ersten, die Dombauhütte in beiden Scanphasen unterstützt. Die erste Phase des Domscans begann am 04. Mai 2015 und dauerte eine Woche.

Christopher Wickenden, Studiengangsleiter des Studienganges 3D Mind & Media an der Hochschule Fresenius in Köln, hat das Projekt zusammen mit Douglas Pritchard in die Wege geleitet. Dies ermöglichte seinen Studenten, bei dem Projekt mitzuwirken. Douglas Pritchard, Dozent an der Heriot-Watt University und technischer Leiter des Projekts Kölner Dom, führte den Scan durch, wobei ihn einige Studenten der Hoch-

58 Vgl. Claus [2015]

schule Fresenius unterstützten. Die Scandaten wurden anschließend von ihm an die Dombauhütte übergeben.⁵⁹

Auch wenn der Kölner Dom bereits einmal in 3D gescannt wurde, ist das Projekt trotzdem einzigartig. Das Gebäude wurde noch nie zuvor in so hoher Auflösung und mit einer vergleichbaren Genauigkeit dokumentiert. Das eröffnet viele neue Möglichkeiten, die man mit dem alten 3D-Modell nicht hatte.⁶⁰

7.1 Planung und Vorbereitung

Ein Projekt dieser Größe verlangt, eine Planungsphase vor Beginn der Durchführung. Finanziert wurde das Projekt vom Kölner Dom selbst. Die Hochschule Fresenius hat darüber hinaus das Projekt aktiv unterstützt.

Durch die Größe des Objektes Kölner Dom gab es Herausforderungen, die gemeistert werden mussten, um zu gewährleisten, dass die Scandaten am Ende der Unternehmung problemlos zusammengefügt werden konnten.

Professor Douglas Pritchard betont, dass ein wichtiger Bestandteil der Vorbereitung für ein Projekt dieser Größe Fachwissen sei. Man brauche nicht nur bereits gesammelte Erfahrung mit der Technik des TLS und den Punktwolken, sondern auch ein allgemei-



Abbildung 14: Scanner auf Kran im Kölner Dom (Quelle: Claus [2016])

⁵⁹ Vgl. Behrendt/Hahn [2015], S.1 f.

⁶⁰ Vgl. Hoffmann [2015], o.S.

nes Verständnis von 3D-Modellen. Zusammen mit Grundkenntnissen über Architektur und den Aufbau des Objektes braucht die durchführende Person, nach Professor Douglas Pritchard, die Fähigkeit, sich schon beim Platzieren des Scanners vorzustellen, wie die Daten am Ende zusammengefügt werden. Damit die Punktwolken nach Ende des Scanvorgangs keine Löcher haben, müssen die Scanner immer so positioniert werden, dass sich die gescannten Bereiche überlappen.

Weitere wichtige Bestandteile in der Planungsphase sind die Beschaffung der benötigten Technik und die Planung von Sicherheitsvorkehrungen. Die Scanner wurden zum Beispiel im Inneren des Doms mithilfe eines Kranes (Abb. 15) an die höherliegenden Stellen bewegt. Um alles zu erfassen wurde der Scanner zudem durch ein Loch in der Decke herabgelassen (Abb 14). Über die Zeit des Scannvorgangs musste er befestigt und gesichert werden. Ein weiteres Beispiel für die technische Herausforderung ist die Befestigung des Scanners, die eigens für den Gebrauch auf den Spitzen der beiden Türme konstruiert wurde. Solche Schwierigkeiten, muss man vor Antritt der Scanphase kennen und sich eine Lösung bereitlegen.⁶¹

Es muss nicht nur der Scanner gesichert werden, wenn er in großen Höhen scannt, sondern auch die Personen, die mit diesem arbeiten. Es muss sichergestellt sein, dass niemand gefährdet und jeder mehrfach gesichert ist. Es gibt zu diesem Thema gesetzliche Vorgaben, die eingehalten werden müssen. Die Personen, die in Höhen arbeiten,



Abbildung 15: Herablassen des Scanners an spezieller Konstruktion (Quelle: Claus [2016])

61 Vgl. Professor Douglas Pritchard, Anlage 1

wie zum Beispiel Professor Douglas Pritchard, der die Fassade der beiden Türme bestiegen hat, müssen diese Anforderungen erfüllen. Zunächst muss der Raum, über dem gearbeitet wird, abgesichert werden. Es darf in keinem Fall zu Personen- oder Sachschäden durch herabfallende Objekte kommen. Personen, die in solchen Höhen arbeiten, müssen zu jeder Zeit gesichert sein. Als Sicherung werden zum Beispiel Gerüste, Geländer, Fangnetze oder Fanggerüste angesehen. Wenn diese nicht zur Verfügung stehen, muss die Person ein Sicherheitsgeschirr tragen, das doppelt gesichert an einer stabilen Befestigung eingehakt wird.⁶² Diese Sicherungsmaßnahmen sind nach Gesetz ab einer Höhe von einem Meter verpflichtend.⁶³ Dies sind Anforderungen, über die man sich vor Durchführung des Projektes in Kenntnis gesetzt haben muss, um die nötigen Vorkehrungen treffen zu können.

Professor Douglas Pritchard hat schon an anderen Projekten vergleichbarer Größe gearbeitet, die eine gute Sicherung verlangten. Um Projekte, wie den Scannvorgang des Kölner Doms, Mount Rushmore oder Rani ki Vav durchführen zu können hat er eine Ausbildung der Industrial Rope Access Trade Association (IRATA) absolviert. Die IRATA bildet mit ihrem Programm Kletterer aus. Diese Industrieklettererausbildung hat den Zweck, Personen auf gefährliche Einsatzgebiete, wie zum Beispiel hohe Baustellen, vorzubereiten.⁶⁴

Die Z+F IMAGER® 5010C und 5010X ermöglichen es jedermann, ein Gebäude zu scannen. Durch die Komplexität des Kölner Doms ist es jedoch erforderlich, dass Personen, die über Fachkenntnisse und Erfahrungen verfügen, die Scanner bedienen. Zudem sollte man sich darüber im Klaren sein, welche Herausforderungen das Objekt mit sich bringt. Douglas Pritchard hat daher empfohlen, vor dem Start des Scans den Dom einmal zu besuchen, um sich einen Plan von der Umgebung machen zu können. Es sollten vor Ort Fotos gemacht und die Positionierung der Scanner geplant werden. Anhand der Eindrücke, die man bei einem solchen ersten Besuch gewinnt, kann man sich auf die Schwierigkeiten einstellen, die das Objekt mit sich bringt.

Laut Douglas Pritchard war der Kölner Dom im Vergleich zu anderen Projekten eine Herausforderung. Im Vergleich zu Objekten, wie zum Beispiel dem Mount Rushmore oder Schloss Schönbrunn, welche von der Größe her eine Herausforderung waren, oder der Durham Cathedral, die eine ähnlich verwinkelte Architektur wie der Kölner

62 Vgl. VBG [ohne Jahr], o.S.

63 Vgl. Bekcers [2010], o.S.

64 Vgl. irata [2016], o.S.

Dom aufweist, ist der Dom jedoch das größte und komplexeste Gebäude, das er bis dato gescannt hat.⁶⁵

Die Hochschule Fresenius hat das Projekt mit Studenten begleitet, die über die gesamte Zeit hinweg unterstützend tätig waren. Hierbei hat der Student Norman Jankowski Douglas Pritchard bei der Besteigung der beiden Türme des Doms unterstützt. Beide haben eine Kletterausbildung absolviert und sind zum Scannen an der Fassade der beiden Türme in dessen Spitzen geklettert. Die beiden verwendeten Scanner wurden jedoch nur von Professor Douglas Pritchard und Christoph Held bedient. Christoph Held war als Vertreter der Marke Zoller und Fröhlich vor Ort.

7.2 Festpunkte und Besonderheiten

Sowohl der Z+F IMAGER® 5010C, als auch der Z+F IMAGER® 5010X erfassen einen vertikalen Sichtbereich von 320° und einen horizontalen 360° um sich herum, indem er nur scannen kann, was sich in seinem direkten Blickfeld befindet. Um alle Bereiche des Doms abzudecken, muss der Scanner an verschiedenen Standorten aufgestellt werden, um sich gegenseitig verdeckende Strukturen komplett abtasten zu können. Die dabei erzeugten Punktwolken müssen sich überlappen, damit die Daten fehlerfrei zusammengefügt werden können und sich im späteren Ergebnis keine Lücken bilden. Besonders die verwinkelten und zahlreichen Gänge des Doms erfordern, eine Vielzahl von verschiedenen Positionen zum Scannen.⁶⁶

In der ersten Phase des Scans wurden ca. 220 Messpunkte⁶⁷ zum Scannen angesetzt. So wurde ein Großteil des Innenraums des Kölner Doms, also etwa ein Drittel der Scandaten im Verlauf einer Woche erfasst. Die zweite Phase wurde für den November desselben Jahres angesetzt.⁶⁸

Die zweite Phase hat sich über einen Zeitraum von zwei Wochen erstreckt, in dem die restlichen zwei Drittel des Kölner Doms gescannt wurden. In der Zeit vom 26.10.2015 bis zum 06.11.2015 wurde die Phase durchgeführt. Während in der ersten Phase lediglich der Innenbereich des Doms gescannt wurde, war es das Ziel der zweiten Phase die Dächer und Türme des Doms zu scannen. Um die beiden Türme zu scannen,

⁶⁵ Vgl. Professor Douglas Pritchard, Anlage 1

⁶⁶ Vgl. Claus [2015]

⁶⁷ Vgl. Anlage 10

⁶⁸ Vgl. Domradio [2015 a]

mussten Douglas Pritchard und ein Student diese sogar erklettern, da es ab einer Höhe von 130 Metern keinen entsprechenden Fahrstuhl gibt.⁶⁹

Trotz größter Sorgfalt haben nicht alle Scans zum gewünschten Ergebnis geführt. Es gab mehr als Scanpositionen. Douglas Pritchard zufolge waren einige Datensätze beschädigt oder es gab Fehler bei der Registrierung der Positionen. Er konnte dennoch ein lückenloses 3D-Modell des Kölner Doms erstellen. Dies ergab eine Punktwolke aus ca. 6 Milliarden Einzelpunkten, die im Anschluss bearbeitet wurden. Die erfasste Datenmenge beläuft sich auf 1,3 Terabyte.⁷⁰ Am 15. März 2016 wurde das Modell an die Dombauhütte übergeben.⁷¹

7.2.1 Im Dom

Der Kölner Dom besitzt eine Vielzahl von Figuren und filigranen Details, die im Moment von den vor Ort beschäftigten Steinmetzen und Bildhauer gepflegt, restauriert und ersetzt werden.⁷² Hierzu nutzen diese ein sogenanntes Punktiergerät, das ihnen dabei hilft, eine beliebige Figur in einem beliebigen Maßstab zu duplizieren. Für diesen Zweck werden drei Orientierungspunkte am Original definiert, die unter Zuhilfenahme des Punktiergeräts auf das zu bearbeitende Rohstück übertragen werden. Zunächst werden grobe Details, wie Nase oder Kinn der Skulptur ausgearbeitet, sodass die Figur nach Beendigung des ersten Schrittes nur aus Flächen besteht. Im weiteren Verlauf werden weitere Details und Rundungen ausgearbeitet. Zu beachten ist hierbei, dass die Figuren keine natürlichen Körperproportionen haben. Da die Figuren am und im Dom häufig sehr weit oben angebracht sind und der Betrachter sie vom Boden aus sieht, besitzen die Figuren zum Beispiel vergrößerte Köpfe und Augen. Dies diene zum Ausgleich der Fluchtwinkel.⁷³

Der filigrane Detailreichtum des Doms lohnt sich, mittels 3D-Laserscantechnik dokumentiert zu werden. Auf diese Weise erhält man die genauen Maße der entsprechenden Figur im Maßstab 1:1. Zudem hat man die Möglichkeit, die Daten in einigen Jahren genau mit zukünftigen Scans zu vergleichen. Dies wäre mit bloßem Auge nicht möglich.⁷⁴

⁶⁹ Vgl. Domradio [2015 b]

⁷⁰ Vgl. Professor Douglas Pritchard, Anlage 1

⁷¹ Vgl. Kölner Wissenschaftsrunde [2016], o.S.

⁷² Vgl. Anlage 9

⁷³ Vgl. Claus [2016]

⁷⁴ Vgl. Eis/Eikermann [2006], S.31

Christoph Held zufolge war das Scannen der detailreichen Figuren im Innenraum des Doms, die teilweise schlecht zugänglich waren und somit den Scanvorgang erschwert haben, eine Herausforderung. Zusätzlich erschwerten die Lichtverhältnisse die Arbeit, da der Dom einerseits große, helle Fenster hat, durch die das Licht einfällt, er aber andererseits auf der anderen Seite durch seine verwinkelte Architektur viele beschattete Stellen hat.

Beide Probleme wurden gelöst. Es wurde von vielen Standorten und unterschiedlichen Ebenen aus gescannt. Um Bereiche erfassen zu können, die sonst nicht erreichbar wären, hat Professor Douglas Pritchard spezielle Konstruktionen⁷⁵ entworfen. Diese Entwürfe wurden von der Dombauhütte umgesetzt. So konnte der Scanner auch schwierige Stellen sicher erreichen.

Die Lichtverhältnisse haben für die eingesetzten Scanner keine weiteren Hindernisse dargestellt. Die integrierte HDR-Kamera ist in der Lage, dunkle Stellen auszugleichen. Hierzu bedient sie sich des Z+F SmartLights, welches dunkle Stellen erhellt. Die HDR-Kamera ist trotz erschwelter Lichtverhältnisse in der Lage, den vollen Kontrastumfang zu erfassen.⁷⁶

Besonders der Bereich, der für die Öffentlichkeit zugänglich ist, wurde mit sehr viel Liebe zum Detail eingerichtet. Es gibt viele verspielte Einzelheiten, wie Säulen, Kanten und Figuren, die das Innere verzieren. Da die beiden eingesetzten Scanner auf Basis von Licht funktionieren, können sie nur erfassen, was in ihrem unmittelbaren Sichtfeld liegt. Das bedeutet, dass jedes Detail von allen Seiten gescannt werden muss, wenn man vermeiden will, dass Löcher in den Punktwolken entstehen.

Um den Innenraum des Doms lückenlos scannen zu können, wurde im Laufe der ersten Scanphase eine Hebebühne eingesetzt, die den Scanner auf die entsprechende Positionen hob. Auf diese Weise konnte der Scanner ohne weitere Probleme den kompletten Innenraum scannen. Zudem wurde der Scanner mithilfe einer von Pritchards Konstruktionen durch ein Loch in der Decke des Innenraums von oben heruntergelassen, um auch dort alles erfassen zu können. Für diese Unterfangen wurden Teile der Kirche kurzzeitig abgesperrt.

75 Vgl. Phase Two – Cologne Cathedral Scanning Project, Anlage 10, Seite XLI ff.

76 Vgl. Christoph Held, Anlage 2

7.2.2 Die Türme

Der Kölner Dom erreicht eine Höhe von 157 Metern. Beide Türme des Doms verfügen ab einer bestimmten Höhe über keinen Fahrstuhl mehr. Es gibt an beiden Türmen auch keine Plattform, die es ermöglichen würde, den Scanner an der Außenseite des Turms zu positionieren. Als Lösung hierfür entwickelte Pritchard eine spezielle Konstruktion (Abb. 16), mit der der Scanner von Innen an den Türmen befestigt werden konnte und nach außen geschoben wurde.⁷⁷

Der Nordturm wurde zuerst gescannt. An der Nordwestseite des Turms befindet sich das 100 bis auf Meter reichende Gerüst der Dombauhütte, von dem aus der Turm betreten werden konnte. Bis auf 130 Meter kann Equipment darüber hinaus mit einem Lastenaufzug hinauf befördert werden. Über dieser Höhe befindet sich einen Seilzug, mit dem man den Scanner und andere Materialien in die Spitze befördern kann. Lediglich die am Scan beteiligten Teammitglieder müssen (ohne Gepäck) außen am Turm hinaufklettern, um in die Spitze zu gelangen.

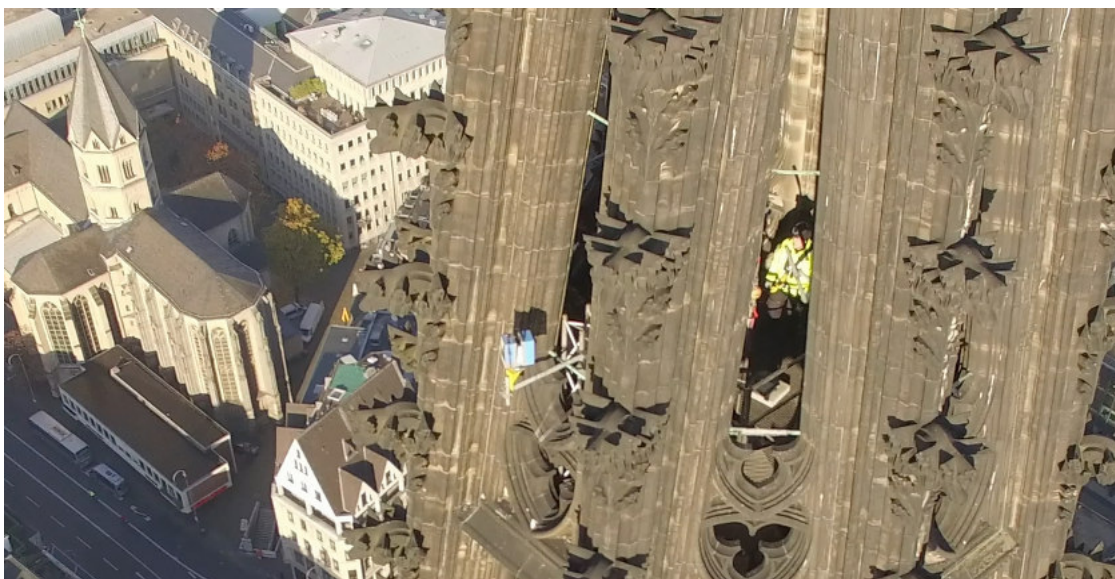


Abbildung 16: Scanner mit spezieller Konstruktion zum Scannen der Türme (Quelle: Claus [2016])

Der Südturm verfügt über kein Gerüst über das man den Turm des Doms betreten könnte. Allerdings gibt es hier eine Besucherplattform, von der aus man an der äußeren Seite des Turm hinauf klettern kann. Der Südturm hat zudem im Gegensatz zum Nordturm, keinen Lastenaufzug, der den Transport der Ausrüstung auf die 130 Meter Ebene ermöglichen würde. Zwischen den beiden Türmen ist jedoch eine Seilbahn eingerichtet, mit der Material vom einem Turm zum anderen transportiert werden kann.

77 Vgl. Anlage 10

Für das Scannteam hatte dies den Vorteil, dass das Material über den Nordturm nach oben befördert und später mit der Seilbahn zum Südturm transportiert werden konnte.

Beim Südturm musste der Scanner vom Team auf den Rücken genommen werden, während sie die Turmspitze von Außen erklommen. Dazu nutzten Douglas Pritchard und Norman Jankowski mit dem Scanner im Gepäck, die äußere Leiter des Turms. Jeder Turm wurde mit jeweils 16 Scandurchläufen erfasst.⁷⁸

8 Anwendungssoftware

Es gibt mehrere Programme, die gleichermaßen für die Arbeit mit Punktwolken geeignet sind. Dazu zählen nach Douglas Pritchard Programme wie *Bentley Pointools*, *Autodesk ReCap*, *Trimble Realworks*, *Leica Cyclone* und *Z+F Laser Control*. All diese Programme können genutzt werden. Um den allgemeinen Workflow der Arbeit mit Punktwolken zu erklären, wird der Fokus im Folgenden auf die Programme *Autodesk ReCap*, *Z+F Laser Control* und *Leica Cyclone* gelegt, da dies die Programme sind, die Pritchard für seine Arbeit nutzt.

Beim Projekt Kölner Dom verwendete er das Programm *Autodesk ReCap*, um den Innenraum der Kirche zu visualisieren und einen virtuellen Rundgang zu generieren. Für das Umwandeln der Daten, die Registrierung der Standorte und die Farbgebung kam das Programm *Z+F Laser Control* zum Einsatz. Lücken und fehlerhafte Datensätze korrigierte er mit *Leica Cyclone*.⁷⁹

Mit welchem Format diese Programme arbeiten, hängt von dem jeweiligen Programm ab. Jeder Anbieter hat hierbei seine eigenen Formate, mit denen die Software arbeitet.⁸⁰ Darüber hinaus gibt es neutrale Formate, die von jedem Anbieter geöffnet werden können. Wenn man im Arbeitsverlauf zwischen den Applikationen wechseln möchte, kann man sein Projekt in diese Formate exportieren.⁸¹

78 Vgl. Claus [2016]

79 Vgl. Professor Douglas Pritchard, Anlage 1

80 Vgl. Wasner [ohne Jahr], o.S.

81 Vgl. Autodesk [2014], o.S.

Format	Kompatibilität
*.rsc, *.rcp	Autodesk ReCap
*.zfs, *.zfprj	Z+F Laser Control
*.ptg, *.ptz, *.ptx	Leica Cyclone
*.pcg, *.pts, *.e57, *.isproj, ...	Andere gängige Programme

Tab. 1: Formate für die Arbeit mit Punktwolken (Quelle: Eigene Abbildung in Anlehnung an Wasner [ohne Jahr], o.S.)

8.1 Autodesk ReCap

Das Programm *Autodesk ReCap 360 Pro* kann man im Abonnement erwerben.⁸² Der Name „ReCap“ steht für „Reality Capture“.⁸³ Das Programm ermöglicht einem die Arbeit mit bereits erfassten Punktwolken, erlaubt aber auch das Erstellen von diesen. Zum Beispiel hat man mit dem Tool *ReCap Photo*® die Möglichkeit, Fotos in eine Punktwolke umzuwandeln. Hierzu benötigt man eine Fotoreihe, die ein Objekt aus möglichst vielen Perspektiven zeigt. Diesen Schritt gab es bei dem Erstellen des 3D-Modells vom Kölner Dom nicht, da bereits durch die Scanner die Daten erfasst wurden, die zu einer Punktwolke zusammengefügt wurden.

Zusammen mit dem Programm *Autodesk ReCap Studio*® hat man nach dem Einfügen der Daten und dem Erstellen der Punktwolke die Möglichkeit, unerwünschte Stellen, wie zum Beispiel die Umgebung des Modells zu löschen, oder diese zu bearbeiten (Abb. 17). Dies empfiehlt sich dann, wenn man den Fokus auf ein einzelnes Objekt legen möchte und dessen Umgebung nicht darstellen möchte.⁸⁴

Für das weiterführende Arbeiten mit dem Projekt, wird empfohlen, das Dateiformat, rsc zu benutzen. Nach dem Zusammenfügen der Fotos oder Scandaten kann man zunächst Änderungen an dem Projekt durchführen. Man kann es mit anderen Modellen verbinden, Bereiche korrigieren oder Lücken füllen. In diesem Arbeitsschritt kann man auch festlegen, mit welchem Abstand die Punkte der Punktwolke voneinander entfernt sein sollen und bestimmt somit die Genauigkeit. Je enger die Punkte aneinander liegen, desto genauer ist das Modell und umso größer ist auch die Datenmenge. Jetzt kann man das Modell als Punktwolke in Form einer RCS-Datei exportieren und in an-

⁸² Vgl. Autodesk [2016a], o.S.

⁸³ Vgl. Coppinger [2016], o.S

⁸⁴ Vgl. Autodesk [2016b], o.S.



Abbildung 17: Workflow mit ReCap Photo ® (Quelle: Autodesk [2016a], o.S.)

deren Programmen, wie *Autodesk® Inventor®* oder *Autodesk® Revit®* weiterverarbeiten.⁸⁵

8.2 Z+F Laser Control

Das Programm *Z+F Laser Control* ist auf die Arbeit mit den Scandaten der verschiedenen Z+F IMAGER ausgelegt. *Z+F Laser Control* unterstützt eine Vielzahl an Formaten, wodurch die Arbeit mit verschiedenen Programmen im selben Projekt vereinfacht wird. Die Einsatzbereiche von *Z+F Laser Control* sind die Registrierung, die Filterung und die Kolorierung. Die Phase der Registrierung umfasst das Zusammenfügen der Datensätze. In der Phase der Filterung kann man durch verschiedene Filter fehlerhafte Datensätze ausbessern und in der Phase der Kolorierung verbindet man die Punktwolke mit den gesammelten Farbdaten. Alle Phasen können unabhängig voneinander durchgeführt werden.⁸⁶

Der Z+F IMAGER® 5010C und der Z+F IMAGER® 5010X ermöglichen ein automatisiertes Zusammenfügen der Datensätze. Sollte es hierbei zu Fehlern gekommen sein, oder ist das Hinzufügen von externen Datensätzen notwendig, kann man in der Phase der Registrierung nachträglich die Scandaten zusammenbringen. Im Laufe der Scanphase haben die Scanner bereits Targets mit Hilfe von Sensoren erkannt und so ihre Position gespeichert. Man kann mit *Z+F Laser Control* den einzelnen Targets Koordinaten zuweisen und diese den erkannten Targets der Scandaten zuteilen.⁸⁷ Z+F

⁸⁵ Vgl. Först [2014], o.S.

⁸⁶ Vgl. Geospatial Modeling & Visualization [2016a], o.S

⁸⁷ Vgl. Geospatial Modeling & Visualization [2016a], o.S

IMAGER® 5010C und Z+F IMAGER® 5010X bedienen sich der Funktion *Z+F Auto-Targets* und die Phase der Registrierung ist automatisiert. Das spart Zeit und schließt Fehler durch den Benutzer aus.⁸⁸

In der Phase des Filterns werden Fehler in den Datensätzen behoben. Punkte, die sich an für das Projekt nicht interessanten Stellen befinden (Abb. 18), werden von diesen Filtern automatisch erkannt und mit einer Maske ausgeblendet. So werden die Fehlerpunkte für den Betrachter unsichtbar, ohne dass die Rohdateien bearbeitet werden müssen. Da jede Fläche von allen Seiten gescannt wurde, entstehen mit dieser Methode keine Lücken in der Punktwolke.⁸⁹ Es gibt sechs verschiedene Filter mit unterschiedlichen Funktionen. Der Export der Daten ist nach Belieben mit oder ohne Filterung möglich.⁹⁰



Abbildung 18: Punktwolke mit überflüssigen Datensätzen
(Quelle: Geospatial Modeling & Visualization [2016a], o.S)

Filter	Funktion des Filters
Intensity	Entfernt Punkte mit zu hoher/geringer Intensität (Abb. 19)
Invalid	Entfernt Punkte, die sich im toten Winkel des Scanners befinden (Abb. 20)
Mixed Pixel	Entfernt fehlerhafte Punkte von Kanten (Abb. 21)
Range	Entfernt Punkte, die sich außerhalb des definierten Entfernungsbereiches befinden (Abb. 22)
Single Pixel	Entfernt einzelne Punkte, die keine Beziehung zu benachbarten Punkten haben (Abb. 23)
Thin	Dünnt die Punktwolke aus (Abb. 24)

Tab. 2: Funktionen der Filter von Z+F Laser Control (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Kersten [2014], S. 24 ff.)

⁸⁸ Vgl. Point of Beginning [2011], o.S

⁸⁹ Vgl. Geospatial Modeling & Visualization [2016b], o.S

⁹⁰ Vgl. Kersten [2014], S. 24 ff.

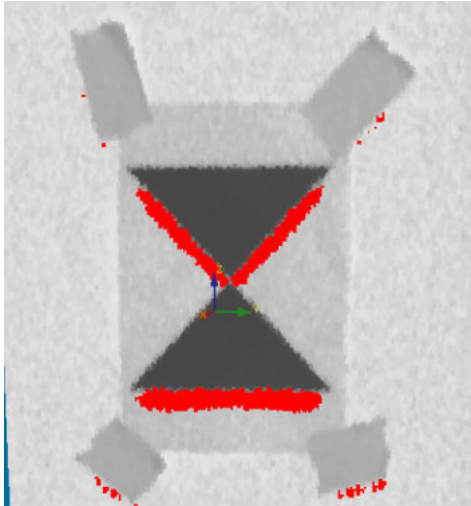


Abbildung 19: Intensity Filter (Quelle: Kersten [2014], S. 24 ff.)

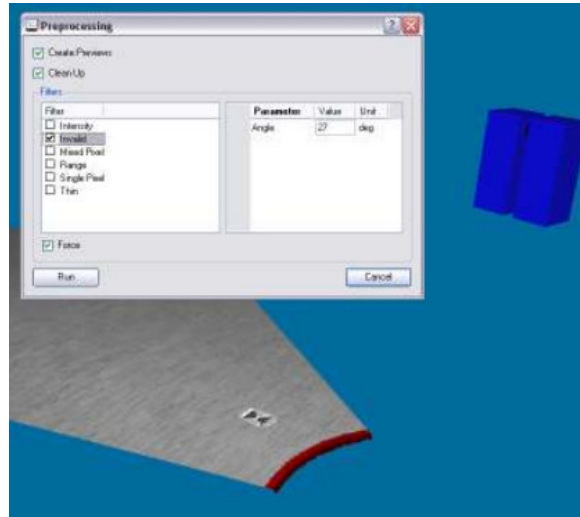


Abbildung 20: Invalid Filter (Quelle: Kersten [2014], S. 24 ff.)

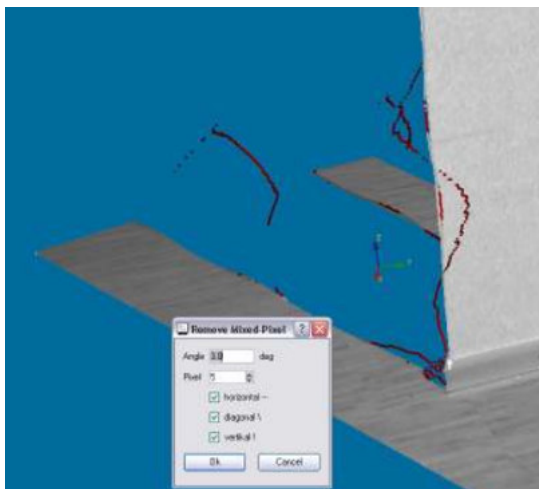


Abbildung 21: Mixed Pixel Filter (Quelle: Kersten [2014], S. 24 ff.)

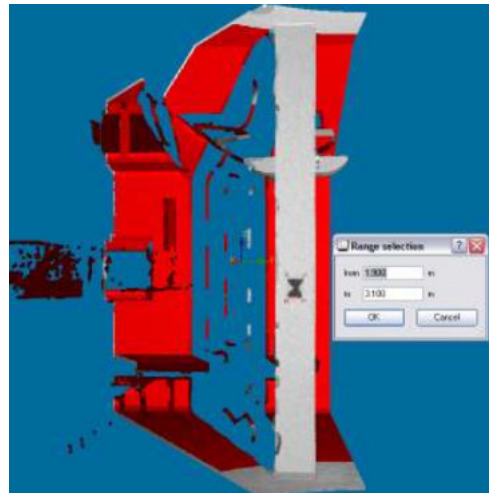


Abbildung 22: Range Filter (Quelle: Kersten [2014], S. 24 ff.)

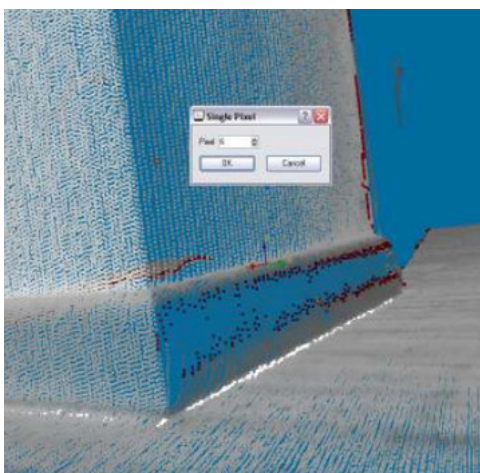


Abbildung 23: Single Pixel Filter (Quelle: (Quelle: Kersten [2014], S. 24 ff.)

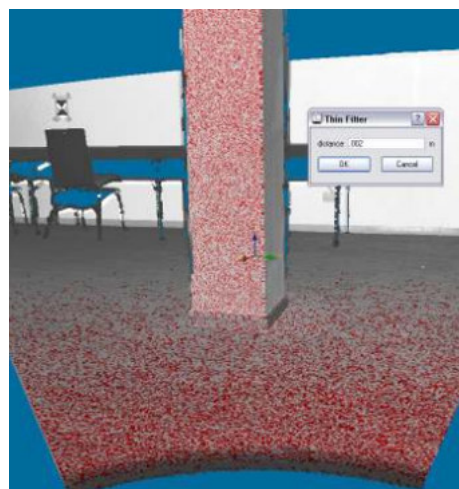


Abbildung 24: Thin Filter (Quelle: (Quelle: Kersten [2014], S. 24 ff.)

In der Phase der Kolorierung hat man die Möglichkeit, Farbinformationen zum 3D-Modell hinzuzufügen. Im Fall des Kölner Doms ist das im Zusammenhang mit der HDR-Kamera geschehen. Mit Hilfe des Color-Plugins für *Z+F Laser Control* kann man die Punktwolke auch manuell einfärben. Neben diesen beiden Funktionen gibt es darüber hinaus die Möglichkeit, die Punktwolke zu färben, indem man diese mit 2D-Bildern kombiniert.⁹¹

8.3 Leica Cyclone

Leica Cyclone ist ein Programm der Marke Fenstermaker, das es einem ebenfalls erlaubt, aus Scannaten Punktwolken zu erstellen und mit diesen zu arbeiten.⁹² In diesem Programm ist es wichtig, mit unterschiedlichen Ebenen zu arbeiten. Das gilt besonders dann wenn man es mit LOD-modeling oder variierender Sichtbarkeit eines Objektes zu tun hat.⁹³

Unter LOD (Level of Detail) versteht man den unterschiedlichen Grad an Genauigkeit, den ein Objekt in einer Animation aufweist. Dies wird gehäuft in Videospielen oder animierten Filmen eingesetzt, wenn sich Objekte optisch aus dem Sichtfeld entfernen oder sich verkleinern. Um die benötigte Leistungsanforderung auf das System zu reduzieren, wird die Genauigkeit eines Objektes mit zunehmender Entfernung gesenkt. Wichtig ist hierbei, darauf zu achten, dass dem Betrachter der Unterschied nicht auffällt.⁹⁴

Mit *Leica Cyclone* kann man sowohl alleinstehend arbeiten als auch, wie bei den beiden vorhergegangenen Programmen, in Kombination mit anderen Programmen. Das Programm bietet unterschiedlichen Möglichkeiten, die Punktwolke zu bearbeiten. Im Fall des Kölner Doms nutzte Douglas Pritchard dieses Programm, um fehlerhafte Datensätze auszubessern und Lücken zu füllen.

Mithilfe eines Filters kann man überflüssige Punkte oder unerwünschte Teile in der Punktwolke (z.B. Autos oder Personen) vom dargestellten Objekt entfernen (Abb. 25). Hierzu nutzt man den *Smooth-Surface-Filter*, wählt zunächst den Bereich aus, den man behalten möchte und kopiert diesen in eine neue Ebene. Wenn man nun den *Smooth-Surface-Filter* anwendet, erhält man zwei verschiedene Punktwolken auf unterschiedlichen Ebenen. Eine Ebene enthält das Objekt, welches man behalten möch-

⁹¹ Vgl. Geospatial Modeling & Visualization [2016c], o.S

⁹² Vgl. Fuselier [ohne Jahr], o.S

⁹³ Vgl. Payne [2012a], o.S.

⁹⁴ Vgl. Valve [2011], o.S.

te, und die zweite die überflüssigen Punkte. Nun kann man die zweite Ebene ausblenden oder löschen (Abb. 26).⁹⁵

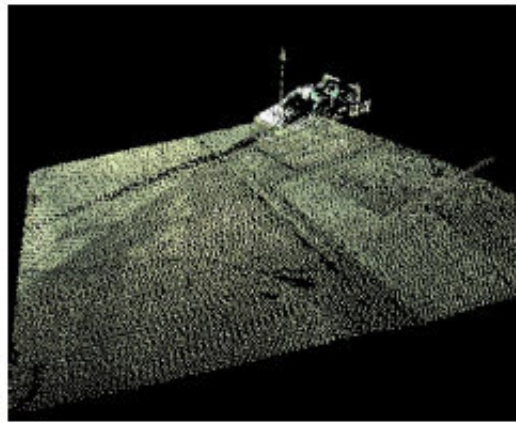


Abbildung 25: Punktwolke vor Smooth-Surface-Filter (Quelle: C.R. Kennedy & Company [2015], S. 48 ff.)

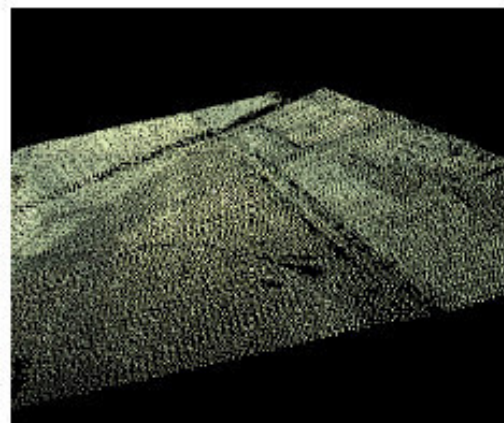


Abbildung 26: Punktwolke nach Smooth-Surface-Filter (Quelle: C.R. Kennedy & Company [2015], S. 48 ff.)

Sollten Lücken in der Punktwolke entstehen, bietet *Leica Cyclone* eine Möglichkeit, diese zu füllen. Mit der *TIN-Mesh*-Funktion hat man die Option, Flächen manuell zu gestalten. Allerdings wird diese Funktion nur für einfache Flächen empfohlen und nicht für komplexere wie Personen, Statuen oder ganze Gebäude. Das erstellte Objekt kann sowohl als Wireframe als auch in solider Form angezeigt werden (Abb. 27 und 28). So hat man die Möglichkeit, dieses genau zu untersuchen und zu bearbeiten.

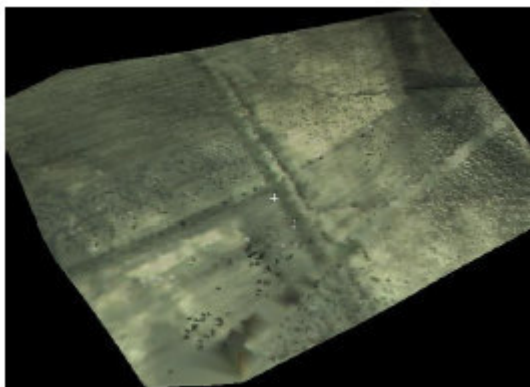


Abbildung 27: TIN Mesh mit Struktur (Quelle: C.R. Kennedy & Company [2015], S. 48 ff.)

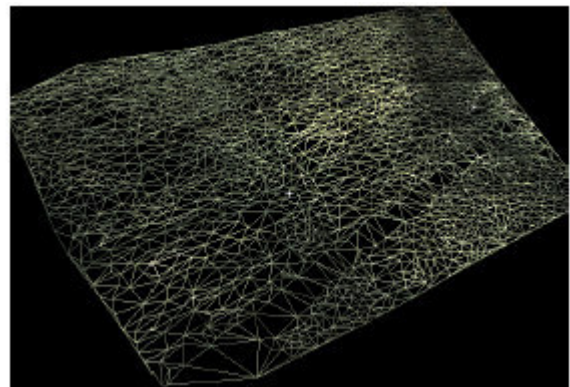


Abbildung 28: TIN Mesh als Wireframe (Quelle: C.R. Kennedy & Company [2015], S. 48 ff.)

Zum Erstellen einer solchen Fläche bedient sich *Leica Cyclone* bereits vorhandener Punkte in der Punktwolke. Wenn sich noch einzelne Punkte ohne Beziehung in der

⁹⁵ Vgl. C.R. Kennedy & Company [2015], S. 48 ff.

Punktwolke befinden, können mit der *TIN-Mesh*-Funktion Erhebungen entstehen, die man nachträglich entfernen muss.

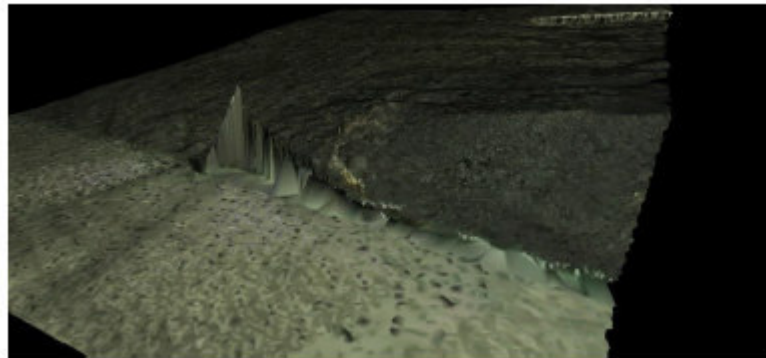


Abbildung 29: Erhebungen im Modell (Quelle: C.R. Kennedy & Company [2015], S. 52 ff.)

Diese unerwünschten Erhebungen (Abb. 29) wählt man aus, indem man sie mit dem *Fence Tool* umrandet und löscht. Nun ist wieder eine Lücke entstanden, die gefüllt werden muss. Kleinere Löcher wie dieses kann man mit der Funktion *Fill Selected Hole* ausbessern (Abb. 30 und 31). Die Korrektur ist nach diesen Handgriffen abgeschlossen.⁹⁶

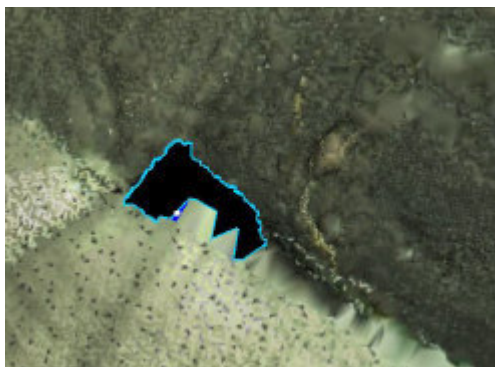


Abbildung 30: Loch nach Entfernung der Erhebung (Quelle: C.R. Kennedy & Company [2015], S. 52 ff.)

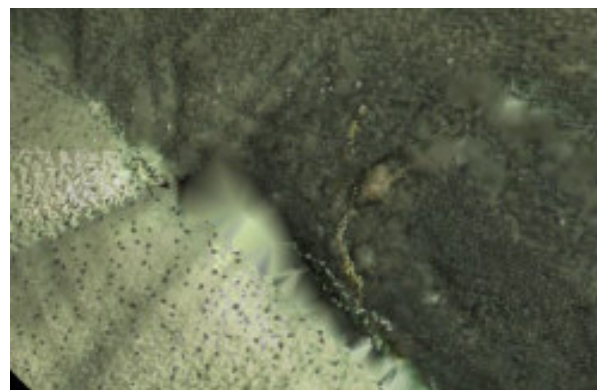


Abbildung 31: Gefülltes Loch (Quelle: C.R. Kennedy & Company [2015], S. 52 ff.)

9 Beurteilung der Visualisierung

Im Zuge der Beurteilung wird untersucht, ob die Visualisierung des Kölner Doms die ursprünglichen Ziele erfüllt hat und ob diese tatsächlich die Genauigkeit aufweisen, die benötigt wird, um mit den Ergebnissen arbeiten zu können. Die Daten werden ebenfalls auf Originaltreue untersucht. Das Ziel des Scanvorgangs war es, ein 3D-Modell des Kölner Doms zu erstellen, das in einem Maßstab von 1:1 eine Genauigkeit von maxi-

⁹⁶ Vgl. C.R. Kennedy & Company [2015], S. 52 ff.

mal drei Millimetern Abweichung hat. Mithilfe der HDR-Kameras sollten die Farben des Objektes im vollen Kontrastumfang erfasst werden.

Um die Visualisierung beurteilen zu können, wird sie im Hinblick auf die tatsächliche Genauigkeit des Resultats und dessen Farbe untersucht. Zudem wird der Aufwand der Unternehmung, sowie die Zeit, die das Projekt in Anspruch nahm, bewertet.

Die Genauigkeit des 3D-Modells wird in der Abweichung gemessen, die diese aufweist. Das Ziel war es, eine maximale Abweichung von 3 Millimetern zu erreichen. Durch die hohe Anzahl an Punkten, die der Z+F IMAGER® 5010C und der Z+F IMAGER® 5010X in der Sekunde erzeugen, ist eine Punktwolke entstanden, die einen Maßstab von 1:1 aufweist (Abb.32 und 33). Die unterschiedlichen Standorte der Scanner wurden jeweils in einem Abstand von ca. fünf Metern voneinander entfernt positioniert. Durch die Nähe der Standorte liegen die Überlappungen der einzelnen Scans bei über 20%. Das hat zu einem sehr genauen Ergebnis geführt⁹⁷. Obwohl einige der Datensätze fehlerhaft waren oder Scanpositionen bei der Registrierung nicht erkannt wurden, konnte Douglas Pritchard dennoch das 3D-Modell vollständig zusammenfügen. Das Ziel des Projekts wurde demnach erfüllt.⁹⁸

Der Kölner Dom ist sehr verwinkelt und hat viele Bereiche, in die kein direktes Sonnenlicht eintritt. Durch die zahlreichen farbigen Fenster im Innenraum wird dieser zwar erhellt, das Sonnenlicht gelangt jedoch nicht in vollem Umfang hinein. Da das 3D-Modell in Farbe sein sollte, konnte man nicht mit herkömmlichen Kameras arbeiten und musste sich der HDR-Technik bedienen, die Bilder in vollem Kontrastumfang erzeugt. Das Ergebnis ist, dass im 3D-Modell auch die dunklen Bereiche des Doms in Farbe gut zu erkennen sind. Die bunten Fenster des Innenraums sind in vollem Farbumfang aufgezeichnet. Es sind nicht nur seine Verzierungen, sondern auch die Textur des Gesteins zu sehen (Abb. 34 und 35). Unter Berücksichtigung des fertigen farbigen 3D-Modells wird das Ziel, den Kölner Dom in vollem Farbumfang digital zu erfassen, als erreicht angesehen.

Die Umsetzung des Projekts besteht aus der Planung, der Scanphase und dem Zusammenfügen der Datensätze in der Nachbearbeitung. Die Vorbereitungsphase hat eine Menge organisatorischer Vorkehrungen erfordert, da sowohl rechtliche Bedingungen geklärt werden mussten als auch neue Konstruktionen für die Befestigung der Scanner entworfen werden mussten. Zudem wurden spezielle Maschinen, wie bei-

97 Vgl. Anlage 3 bis 7

98 Vgl. Professor Douglas Pritchard, Anlage 1

spielsweise die Hebebühne im Inneren des Doms, organisiert. Zu der zeitlichen Anforderung von einem Jahr, kommt die körperliche Belastung, die allen Beteiligten abverlangt wurde. Um den Dom in vollem Umfang erfassen zu können, wurden die beiden Turmspitzen bestiegen. Das ist ein großer Aufwand, der unter Berücksichtigung der Historie und der Bedeutung der Kirche für die Stadt als angemessen erachtet wird.

Die erste Phase, in der gescannt wurde startete am 04. Mai 2015 und dauerte eine Woche. Die zweite Phase wurde in der Zeit vom 26.10.2015 bis zum 06.11.2015 durchgeführt. Insgesamt belaufen sich die beiden Phasen auf einen Zeitraum von drei Wochen. Zwischen der ersten und der zweiten Phase wurden Vorbereitungen für die Besteigung des Kölner Doms getroffen. Die Scanner wurden im Laufe der beiden Phasen von ca. 660 verschiedenen Positionen auf, in und um den Kölner Dom eingesetzt. Dies erbrachte eine Datenmenge von 1,3 Terabyte, die verarbeitet werden mussten. Hierzu zählt nicht nur das Zusammenfügen der Daten, sondern auch das Korrigieren fehlerhafter Datensätze. Bis kurz vor Übergabe des 3D-Modells an die Dombauhütte am 15.03.2016 hat Douglas Pritchard an seiner Fertigstellung gearbeitet. Die Phase des Zusammenfügens hat sich also über einen Zeitraum von ca. fünf Monaten erstreckt. Zusammen mit der Planung, der Durchführung und der Nachbearbeitung des Projekts beläuft sich der gesamte Zeitaufwand von diesem auf ca. ein Jahr. Unter Berücksichtigung des Umfangs des Projekts und der Genauigkeit, mit der vorgegangen wurde, wird diese Zeit als angemessen bewertet.



Abbildung 32: Original (Quelle: Claus [2016])



Abbildung 33: 3D-Modell (Quelle: Claus [2016])

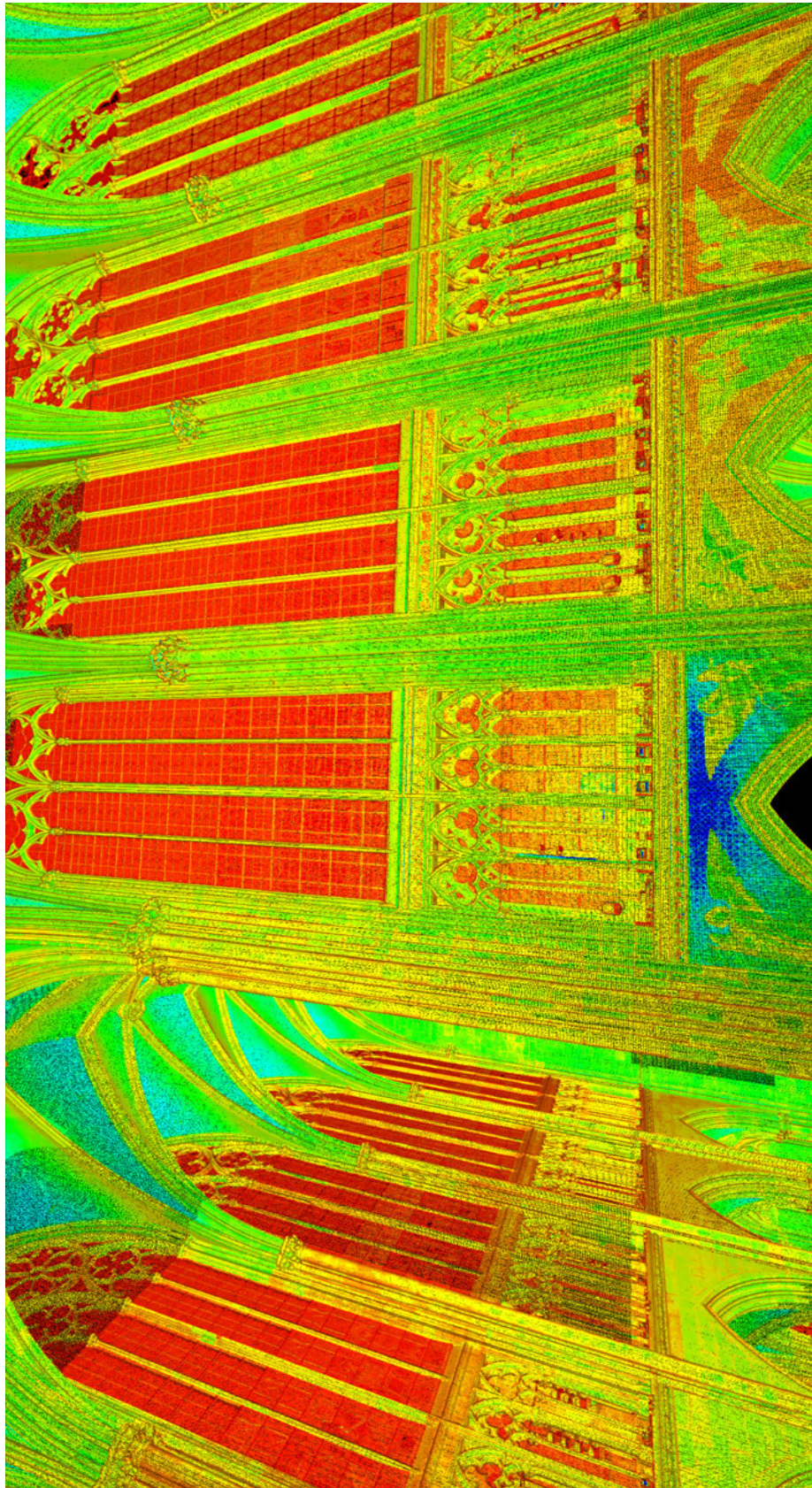


Abbildung 34: Innenraum des Kölner Doms (ohne Farbe)
(Quelle: Douglas Pritchard)

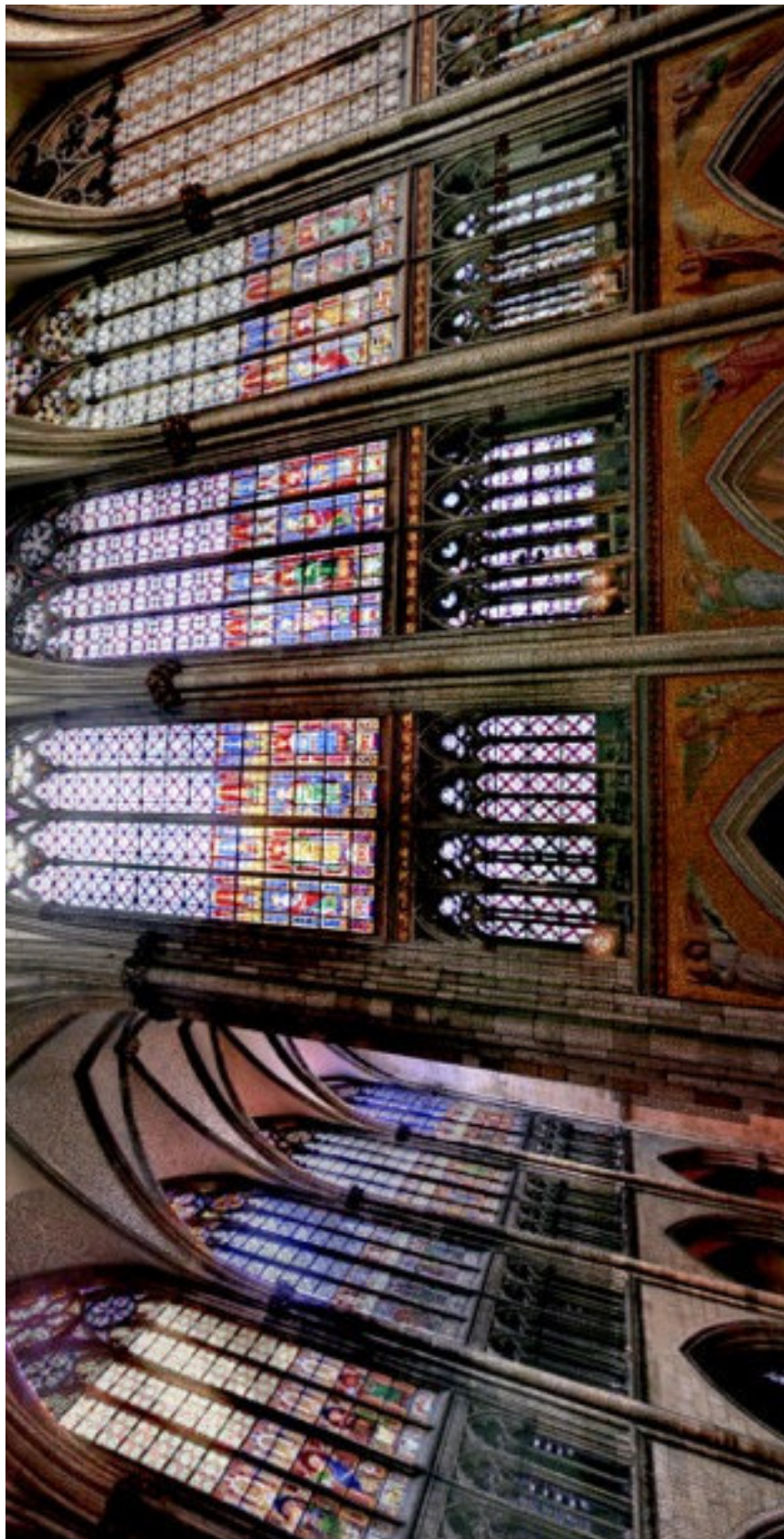


Abbildung 35: Innenraum des Kölner Doms (mit Farbe)

Quelle: Douglas Pritchard)

10 Fazit

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, zu untersuchen, ob das Projekt, bei dem der Kölner Dom in 3D eingescannt wurde, seinen Aufwand wert war und sein Ziel erfüllt hat. Der Vorgang des Scanens hat sich auf zwei Phasen verteilt und dauerte insgesamt drei Wochen. Um zu verstehen, warum dieser Aufwand betrieben wurde, muss man zunächst wissen, was den Dom so besonders macht. Zu diesem Zweck wurde die Geschichte des Kölner Doms untersucht und deren Besonderheiten ergründet. Es wurden Experteninterviews geführt, um den Vorgang selbst bewerten zu können, und es wurden die fertigen Scandaten untersucht und bewertet.

Der Kölner Dom ist in seiner Geschichte und in seiner Bauweise einzigartig. Seine Architektur und seine Ausstattung werden täglich von vielen Besuchern betrachtet. Er ist als UNESCO-Weltkulturerbe eingestuft und hat somit eine große Bedeutung für die Stadt Köln.

Der Titel des Weltkulturerbes bringt jedoch nicht nur Vorteile mit sich. Titelträger sind dazu verpflichtet, dafür Sorge zu tragen, dass das Gebäude in einem guten Zustand für die Nachwelt erhalten bleibt. Die daraus folgenden Schutzmaßnahmen und Restaurierungsarbeiten können sehr teuer werden und werden durch den hohen Besucherandrang, der auf ein Weltkulturerbe trifft, erschwert.

Der Kölner Dom hat stetig gegen den Zerfall anzukämpfen. Umwelteinflüsse und Verschmutzung durch Besucher schädigen die Kirche jeden Tag. Zudem hat der Dom durch seine Bauzeit von über 600 Jahren die Besonderheit, dass verschiedene Bereiche mit unterschiedlichen Gesteinen gebaut wurden.

Die Organisation der Dombauhütte hat sich dazu verschrieben, den Dom zu erhalten und sowohl dessen Architektur als auch die zahlreichen Figuren, welche an seine Fassade zieren, bei Bedarf zu restaurieren. Bei einer Höhe von bis zu 157 Metern stellt dies für die Gerüstbauer eine große Herausforderung dar.

Um die Arbeit der Dombauhütte zu unterstützen, die Restaurierungsarbeiten zu vereinfachen und den Dom für die Nachwelt zu erhalten, wurde der Kölner Dom 2015 in 3D eingescannt. Die dabei erfassten Daten besitzen große Genauigkeit in einem Maßstab von 1:1, haben eine maximale Abweichung von drei Millimetern und geben dem Betrachter nicht nur ein schönes Bild des Doms wieder, sondern auch tiefergehende

Einblicke. Man erhält Informationen über Schäden in der Architektur, erkennt temperaturbelastete Stellen und sieht, ob das Gestein mit Wasserschäden zu kämpfen hat.

Der jetzige Zustand des Gebäudes ist in sehr genauem Maße digital für die Nachwelt erhalten. Wird der Dom in einigen Jahren ein weiteres Mal gescannt, hat man jetzt die Möglichkeit, daraus Vergleiche zu ziehen. Da die erfassten Daten sehr genau sind, würde man im Falle einer weiteren Scanphase selbst kleinste Abweichungen erkennen. Man würde sehen, ob sich die Wände des Doms verschoben haben oder ob es anderweitig Abtragungen oder Veränderungen gab. Hierdurch könnte man Prognosen für die Zukunft erstellen und die Arbeit der Dombauhütte wäre vereinfacht.

Durchgeführt wurde das Projekt von der Hochschule Fresenius unter der technischen Leitung der School of Energy, Geoscience, Infrastructure und Society, der Heriot-Watt University, Edinburgh. Die Firma Zoller und Fröhlich, aus deren Haus die verwendeten Scanner stammen, und die Dombauhütte haben ebenfalls zu der Ermöglichung des Projektes beigetragen.

Zum Scannen wurden der Z+F IMAGER® 5010C und der Z+F IMAGER® 5010X genutzt. Diese können ein sehr genaues dreidimensionales Abbild der erfassten Objekte darstellen. Sie bedienen sich der Technologie des terrestrischen Laserscannings, basieren auf Licht und schießen einen Laser von sich, der mithilfe eines rotierenden Spiegels die Reflexionen auffängt und somit die genaue Entfernung zu einem Objekt messen kann. Auf diese Weise werden bis zu einer Million Punkte pro Sekunde ermittelt, die Koordinaten darstellen. Diese XYZ-Koordinaten bilden Punktwolken, mit denen man am Ende das 3D-Modell erstellen kann.

Da die Scanner auf Licht basieren und somit nur erfassen können, was sie „sehen“, müssen die Scanner von unterschiedlichen Positionen aus eingesetzt werden. Beim Scannen des Kölner Doms wurden mehr als 660 Scanpositionen benötigt. Die Scanner erfassen alles in einem 360° Winkel um sich herum. Die gesammelten Ergebnisse werden im Anschluss zusammengefügt.

Die beiden Laser sind zudem nicht für die Gesundheit schädlich und können ohne Probleme in der Öffentlichkeit eingesetzt werden. Der Z+F IMAGER® 5010X hat zudem die Möglichkeit, seine Position selbstständig zu erkennen und somit das spätere Zusammenfügen der Daten zu erleichtern.

Ergänzend zu der Position der Koordinaten bedienen sich die angewendeten Scanner einer integrierten HDR-Kamera, die dafür sorgt, dass das zu erfassende Objekt originalgetreu in Farbe dargestellt wird. Hierzu werden mehrere Bilder vom selben Motiv

fotografiert. Einige sind gewollt unterbelichtet und überbelichtet. Hieraus wird ein Mittelwert erstellt, der die Farben unverfälscht von Wetter oder Tageszeit darstellt. Durch den Einsatz dieser Kamera erhielt das 3D-Modell des Kölner Doms seine originalgetreue Farbe.

Durch die Höhe des Doms und seine verwinkelte Architektur kamen eine Vielzahl an Schwierigkeiten auf das Scanteam zu. Diese wurden durch spezielle Konstruktionen gelöst. Was den Vorgang des Scanens betrifft, so konnte anhand von Experteninterviews gezeigt werden, dass die Planung gut durchdacht war und die Organisation des Projektes gelungen ist. Es gab keine weitgreifenden Verzögerungen und jede Schwierigkeit konnte überwunden werden. Da Profis an dem Projekt gearbeitet haben, die schon mehrfach mit vergleichbar großen Projekten beschäftigt waren, kam es zu wenigen Fehlern und das Projekt wurde reibungslos beendet. Allerdings konnten nicht alle der rund 660 Scandurchläufe genutzt werden, da einige Datensätze fehlerhaft waren oder Fehler bei der Registrierung der Scanpositionen auftraten. Am Ende ergab es dennoch ein lückenloses Abbild des Kölner Doms. Sowohl Professor Douglas Pritchard als auch Christoph Held sagen, dass sie in der Planung und der Durchführung nichts anders machen würden, wenn sie das selbe Projekt ein weiteres Mal durchführen würden.

Unter Berücksichtigung der Beurteilung der Visualisierung, ist das Ziel, das mit dem Projekt verfolgt wurde, erfüllt worden. Die Untersuchung der Genauigkeit ergab, dass die Scandaten durch eine gute Planung die gewünschte Präzision erreicht haben. Die Farbe aller Details des Doms wurden in vollem Kontrast- und Farbumfang erfasst und dargestellt. Der zeitliche Aufwand des gesamten Projektes belief sich auf ca. ein Jahr und war mit großem Aufwand verbunden. Unter Berücksichtigung der historischen Bedeutung des Kölner Doms wird dieses als gerechtfertigt angesehen. Unter diesen Gesichtspunkten wird die Durchführung des Projektes als sehr gut eingeschätzt. Einige Fehler in den rund 660 Datensätzen haben nicht verhindert, dass das 3D-Modell des Kölner Doms vollständig und in der gewünschten Genauigkeit von maximal 3 Millimetern Abweichung erstellt wurde. Die Daten des 3D-Modells wurden am 15. März 2016 erfolgreich an die Dombauhütte übergeben.

Insofern steht zu hoffen, dass es in Zukunft weitere 3D-Scanning Projekte geben wird, sodass vergleichbares Material entsteht, unter dessen Zuhilfenahme man dem Zerfall des Kölner Doms noch besser entgegenwirken kann.

Literaturverzeichnis

4GEO [ohne Jahr]

3D Messsysteme, verfügbar unter: <http://www.4geo.de/3dlaserscanner> (24.04.2016)

Absolute Geometries [2009]

3D Scanning. Definition, verfügbar unter: <http://www.absolutegeometries.com/3D-Scanning.html> (26.04.2016)

Academic [ohne Jahr]

Gerokreuz, verfügbar unter: <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/514603> (26.05.2016)

AG-Umwelt [2016]

Der saure Regen – Ursachen und auftretende Schäden, verfügbar unter: <http://www.ag-umwelt.net/saurer-regen/> (24.04.2016)

Ahrens D./Hoffmann H. C./Keller D./Thomas K. [2001]

Unser Weltkulturerbe. Der Dom zu Köln, 1. Aufl., Köln 2001.

Akademie der Wissenschaften und der Literatur [2016]

Was ist Terrestrisches Laserscanning?, verfügbar unter: <http://www.spatialhumanities.de/ibr/technologie/terrestrisches-laserscanning.html> (14.04.2016)

Autodesk [2014]

About Autodesk ReCap Pro, verfügbar unter: <https://knowledge.autodesk.com/support/recap/learn-explore/caas/CloudHelp/cloud-help/ENU/Reality-Capture/files/GUID-01AB7E43-C03C-47FE-9D6D-376E1F2FDCBA-hm.html> (02.06.2016)

Autodesk [2016a]

RECAP 360 PRO, verfügbar unter: <http://www.autodesk.de/store/products/recap-360-pro?term=1year&support=basic> (25.05.2016)

Autodesk [2016b]

Fotobasierte Punktwolken eigener Modelle in Revit platzieren, verfügbar unter: <http://www.autodesk.de/adsk/servlet/pc/item?siteID=403786&id=22036368> (25.05.2016)

Beckers L. [2010]

Sichere Arbeit in der Höhe, verfügbar unter:

<http://www.arbeitssicherheit.de/de/html/fachbeitraege/anzeigen/361/Sichere-Arbeit-in-der-Hoehe/> (25.05.2016)

Behrendt M./Hahn M. [2015]

Pressemitteilung. Kölner Dom wird eingescannt: Hochschule Fresenius startet 3D-Projekt, verfügbar unter: http://www.hs-fresenius.de/fileadmin/user_upload/PDF/Aktuelles_News/Presse/2015/15_05_04_PM_DOMScan.pdf

(26.04.2016)

Billingsley, S. [2016]

Hands On with the Z+F 5010C, verfügbar unter:

<http://www.spar3d.com/blogs/confessions-of-a-hired-gun/hands-on-with-the-zf-5010c/> (02.04.2016)

Caspary H./Hoffmann H. C./Keller D./Thomas K. [2001]

Unser Weltkulturerbe. Die Aufnahme des Kultur- und Naturerbes der Welt – Auszeichnung oder Verpflichtung?, 1. Aufl., Köln 2001.

Claus D. [Regie] [2015]

Kölner Dom wird eingescannt, Köln, Hochschule Fresenius, 2015. - Dokumentation Farbe 9 min, verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=d3TUtYFbiK8> (26.04.2016)

Claus D. [Regie] [2016]

3D Laser Scan des Kölner Doms | Hochschule Fresenius, Köln, Hochschule Fresenius, 2016. - Dokumentation Farbe 22min, verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=YyTEiEvzd7g> (25.05.2016)

C.R. Kennedy & Company [2015]

Leica Cyclone Basic User Manual, verfügbar unter: <https://survey.crkennedy.com.au/sites/default/files/downloads/Cyclone%20Basic%20Tutorial.pdf> (03.06.2016)

Coppinger J. [2016]

Autodesk ReCap, What Is It, Reality?, verfügbar unter:

http://cad.about.com/od/BIM_Drafting_Design/a/Autodesk-Recap.htm (25.05.2016)

Demi M. [2010]

Röntgendiagnostik für „Patient“ Kölner Dom: Verfall auf der Spur, verfügbar unter: https://www.dbu.de/123artikel30448_798.html (26.05.2016)

Deutsche UNESCO-Kommission e.V. [2016 a]

Kölner Dom, verfügbar unter: <http://www.unesco.de/kultur/welterbe/welterbe-deutschland/koeln.html> (02.04.2016)

Deutsche UNESCO-Kommission e.V. [2016 b]

Welterbestätten in Deutschland, verfügbar unter:
<https://www.unesco.de/kultur/welterbe/welterbe-deutschland.html> (02.04.2016)

Die Welt [2010]

Kölns Doms mit der größten Maschine des Mittelalters, verfügbar unter: <http://www.welt.de/kultur/article11099252/Koelns-Dom-mit-der-groessten-Maschine-des-Mittelalters.html> (31.05.2016)

Dombau Köln [2016]

Dombauhütte – Info, verfügbar unter: <http://www.dombau-koeln.de/index.php?id=2&ssl=0> (23.04.2016)

Domradio [2015 a]

Erste Ergebnisse des DOM-Scan, Köln, Hochschule Fresenius, 2015. - Radiobeitrag 2min, verfügbar unter: <https://soundcloud.com/hochschule-fresenius/erste-ergebnisse-des-domscan> (26.04.2016)

Domradio [2015 b]

2. Phase: 3D Vermessung Kölner Dom, Köln, Hochschule Fresenius, 2015. - Radiobeitrag 6 min, verfügbar unter: <https://soundcloud.com/hochschule-fresenius/erste-ergebnisse-des-domscan> (26.04.2016)

Eis E./ Eikermann R. [2006]

Barocke Wachsbildwerke. Restaurieren und Entdecken, 1. Aufl., München 2006.

express [2011]

In 100 Meter Höhe, Gerüstbau am Dom ein echter Hingucker, verfügbar unter: <http://www.express.de/koeln/in-100-meter-hoehe-geruestbau-am-dom-ein-echter-hingucker-14891706> (01.06.2016)

Frey, B. S./Steiner, L. [2010]

Alternativen zur UNESCO-Liste des Welterbes, verfügbar unter:
<http://www.oekonomenstimme.org/artikel/2010/06/alternativen-zur-unesco-liste-des-welterbes/> (03.04.2016)

Fuselier R. J. [ohne Jahr]

A Perfect Workflow, verfügbar unter: http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/zz/general/general/TruStories/A%20Perfect%20Workflow%20TRU_en.pdf (26.05.2016)

Först T. [2014]

Der optimale ReCap Workflow, verfügbar unter: <http://blog.nupis.de/der-optimale-recap-workflow/> (25.05.2016)

Geo Science SA [ohne Jahr]

Z+F IMAGER 5010X, 3D Laserscanner, verfügbar unter: <http://geo-science.ch/zf-imager-5010x-3d-laserscanner/> (24.04.2016)

Geospatial Modeling & Visualization [2016a]

Z+F Laser Control: Manually Identifying Feature Points, verfügbar unter: <http://gmvc.cast.uark.edu/scanning/zf-laser-control-manually-identifying-feature-points-2/> (02.06.2016)

Geospatial Modeling & Visualization [2016b]

Z+F Laser Control: Filtering and Exploring Your Data, verfügbar unter: <http://gmvc.cast.uark.edu/scanning/zf-laser-control-filtering-and-exporting-your-data-2/> (02.06.2016)

Geospatial Modeling & Visualization [2016c]

Z+F Laser Control: Color Mapping, verfügbar unter: <http://gmvc.cast.uark.edu/scanning/zf-laser-control-color-mapping-2/> (02.06.2016)

Gummich S./Buth C. [2016a]

Die Dombauhütte, verfügbar unter: http://www.planet-wissen.de/kultur/nordrhein_westfalen/koelner_dom/pwiediedombauhuette100.html (23.04.2016)

Gummich, S./ Buth, C. [2016b]

Kölner Dom, verfügbar unter: http://www.planet-wissen.de/kultur/nordrhein_westfalen/koelner_dom/pwwbkoelnerdom100.html (02.05.2016)

Hoffmann A. [2015]

Kathedrale im Scanner, verfügbar unter: <http://www1.wdr.de/nachrichten/rheinland/vermessung-dom-100.html> (26.04.2016)

Hoos, E. [2009]

Der Titel Welterbe ist bares Geld wert, verfügbar unter:

<http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/tourismus-der-titel-welterbe-ist-bares-geld-wert-1845218.html> (03.04.2016)

irata [2016]

Information, verfügbar unter: <http://www.irata.org/> (01.06.2016)

Katholisches Stadtdekanat Köln [ohne Jahr]

Heilige Messen, verfügbar unter: http://gemeinden.erzbistum-koeln.de/kirche_koeln/kirche_city/heilige_messen.html (31.05.2016)

Kersten T. P. [2014]

Terrestrische Laserscanner, verfügbar unter: http://geo-ing.ch/cmsfiles/t6b_scanner_kersten_de.pdf (02.06.2016)

Kölner Stadt Anzeiger [2010]

Messungen. Dom-Türme kleiner als erwartet, verfügbar unter:

<http://www.ksta.de/messungen-dom-tuerme-kleiner-als-erwartet-11893982>
(27.04.2016)

Kölner Wissenschaftsrunde [2016]

Abschluss des Projektes 3DOM, verfügbar unter: <http://www.koelner-wissenschaftsrunde.de/aktuelles/abschluss-des-projektes-3dom/> (27.04.2016)

Laserscanning Europe [2016]

Z+F IMAGER 2010, verfügbar unter: <http://www.laserscanning-europe.com/de/glossar/zf-imager-5010> (24.04.2016)

Lehnen G. [ohne Jahr]

Köln – die Rheinmetropole und alte Römerstadt, verfügbar unter: http://www.guenter-lehnen-koeln.de/Kunststadt_Bauwerke_Dom.html (01.06.2016)

Mach R. [2000]

3D Visualisierung. Galileo Design, 1. Aufl., Bonn 2000.

Milbrandt, F. [2015]

Welterbestätten. 40 Welterbestätten gibt es in Deutschland, jedes Jahr kommen neue hinzu. Einige der Bewerber gehen leer aus, verfügbar unter: <http://www.zeit.de/zeit-magazin/2015/29/deutschlandkarte-unesco-weltkulturerbe-weltnaturerbe> (02.04.2016)

Müller M. [2013]

Gero-Kreuz, verfügbar unter: <http://www1.wdr.de/kultur/kunst/west-art-meisterwerke/gerokreuz104.html> (24.04.2016)

NetCologne Gesellschaft für Telekommunikation mbH [2016]

Der Kölner Dom, verfügbar unter:
http://www.koeln.de/tourismus/sehenswertes/koelner_dom (02.04.2016)

Nikon [2016]

Was ist HDR-Fotografie? Verfügbar unter: https://nikoneurope-de.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/27529/~was-ist-hdr-fotografie%3F (02.04.2016)

Payne, A. [2011]

Leica Cyclone 7.0: Introduction to Modeling Buildings, Structures, and Objects, verfügbar unter: <http://gmv.cast.uark.edu/scanning/software/leica-software/leica-cyclone/cyclone-workflows/leica-cyclone-beginners-workflow-for-building-modeling-3/> (26.05.2016)

Photab [ohne Jahr]

Matrixvermessung/Mehrfeldmessung, verfügbar unter: <http://www.photab.de/foto-wissen/matrixmessung-mehrfeldmessung> (31.05.2016)

Point of Beginning [2011]

Zoller+Fröhlich Release z+F Laser Control 8.2, verfügbar unter: <http://www.pobonline.com/articles/95914-zoller-fra-hlich-release-z-f-lasercontrol-8-2> (02.06.2016)

richtig-fotografiert [ohne Jahr]

Der ISO-Wert, verfügbar unter: <http://www.richtig-fotografiert.de/technische-grundlagen-der-fotografie/iso-wert/> (31.05.2016)

Rouse M. [2011]

CAD (computer-aided design), Definition, verfügbar unter:
<http://whatis.techtarget.com/definition/CAD-computer-aided-design> (26.05.2016)

Rusu R. B. / Cousins S. [2011]

What is a Point Cloud?, verfügbar unter: <http://pointclouds.org/about/> (26.04.2016)

Schock-Werner, B. [2016]

Der Kölner Dom. Baugeschichte, verfügbar unter: <http://www.koelner-dom.de/index.php?id=geschichte> (02.04.2016)

Springer Gabler [ohne Jahr]

CAD, Definition, verfügbar unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/cad.html>
(26.05.2016)

Staiger R. [2007]

Auswahlkriterien für terrestrische Laserscanner, verfügbar unter: http://www.geomatik-hamburg.de/tls/tls2007/vortraege/01_tls2007_staiger.pdf (26.04.2016)

Traichel, S. [2011]

Weltkulturerbe: Segen und Fluch zugleich, verfügbar unter:
<http://www.wz.de/home/kultur/weltkulturerbe-segen-und-fluch-zugleich-1.761116>
(03.04.2016)

Trigon Art [ohne Jahr]

Punktwolken. Universell – zeitbeständig – kostengünstig, verfügbar unter:
<http://www.trigonart.com/punktwolken-537> (24.04.2016)

Udovicic, L. [2010]

Damit nichts ins Auge geht ... Schutz vor Laserstrahlung, Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BauA), 2010, verfügbar unter:
<http://www.baua.de/cae/servlet/contentblob/675474/publicationFile/47205/A37.pdf>
(02.04.2016)

Valve [2011a]

LOD, verfügbar unter: <https://developer.valvesoftware.com/wiki/LOD> (26.05.2016)

VBG [ohne Jahr]

Arbeiten in großer Höhe, verfügbar unter:
https://www.vbg.de/apl/arbhilfe/unterw/18_arb.htm (25.05.2016)

Wasner G. [ohne Jahr]

Punktwolke zu CAD, verfügbar unter: <http://www.vision-w.de/punktwolke-zu-cad/>
(02.06.2016)

WDR [2016]

Aachener Dom: Nach 30 Jahren grundsaniert, verfügbar unter:
<http://www1.wdr.de/nachrichten/rheinland/aachener-dom-sanierung-100.html>
(31.05.2016)

Zogg, H.-M. [2016]

Terrestrisches Laserscanning – Ein allgemeiner Überblick über Messmethoden und Einsatzmöglichkeiten in der Geomatik, verfügbar unter: http://www.leica-geosystems.ch/de/GeomatikNews_Zogg_neu.pdf (14.04.2016)

Zoller + Fröhlich GmbH [2016 a]

Über Z+F, verfügbar unter: <http://www.zofre.de/UEber-Z-F.22.0.html> (02.04.2016)

Zoller + Fröhlich GmbH [2016 b]

Leitbild, verfügbar unter: <http://www.zf-laser.com/Leitbild.35.0.html> (02.04.2016)

Zoller + Fröhlich GmbH [2016 c]

Case Study. High Dynamic Range, verfügbar unter: http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Case_studies/Case_Study_HDR_D_komp.pdf (02.04.2016)

Zoller + Fröhlich GmbH [2016 d]

Case Study. Effiziente geometrische Erfassung historischer Bauwerke am Beispiel von Schloss Johannisburg in Aschaffenburg, verfügbar unter: http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Reseller_Area/Case_Study/Case_Study_Johannisburg_d_komp.pdf (02.04.2016)

Zoller + Fröhlich GmbH [2016 e]

Case Study. Scannen in explosionsgefährdeten Offshore-Bereichen, verfügbar unter: http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Case_studies/CaseStudy_Ramboll_D_kompr.pdf (24.04.2016)

Zoller + Fröhlich GmbH [2016 f]

The X marks the spot, verfügbar unter: http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Broschueren/Flyer_IMAGER_X_Scout_de_comp.pdf (24.04.2016)

Zoller + Fröhlich GmbH [2016 g]

Case Study. High-End 3D-Verfahren beim bayrischen Landeskriminalamt, verfügbar unter: http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Case_studies/Case_Study_LKA_small.pdf (24.04.2016)

Anlagen

Anlage 1:	Experteninterview: Douglas Pritchard, Associate Professor	XIX
Anlage 2:	Experteninterview: Christoph Held	XXI
Anlage 3:	3D-Modell des Kölner Doms 1	XXIII
Anlage 4:	3D-Modell des Kölner Doms 2	XXIV
Anlage 5:	3D-Modell des Kölner Doms 3	XXV
Anlage 6:	Ausschnitt des 3D-Modells des Kölner Doms 1	XXVI
Anlage 7:	Ausschnitt des 3D-Modells des Kölner Doms 2	XXVII
Anlage 8:	Schäden am Kölner Dom	XXVIII
Anlage 9:	Restaurierte Figur	XXXIII
Anlage 10:	Phase Two – Cologne Cathedral Scanning Project	XXXIV

Anlage 1: Experteninterview: Douglas Pritchard, Associate Professor

The application of 3D laser scanning technology in order to visualize historic buildings as illustrated by the example of Cologne Cathedral

1. What makes Cologne Cathedral interesting for you?

Cologne Cathedral is interesting to me because of its age, size and documentation challenge. As with many of my previous projects, I am specifically interested in UNESCO World Heritage Sites.

2. How was the project financed? Are there supporters and sponsors?

The funding was entirely through the Cathedral. The main supporter was Fresenius University.

3. Can you tell me something about the process of preparation? What was needed to get the project going? What kind of measures had to be taken?

To properly prepare for a project this size is to have considerable experience in terrestrial laser scanning, point cloud registration and an understanding of 3D modelling. Having a background in architecture is also helpful. Contemporary laser scanners are fast and easy to operate, but the operator should have an experienced understanding of how the data will eventually go together and be used. The fundamental issue is developing accurate dimensional data with an understanding of the level of error.

Proper technical planning and a thorough health & safety plan are also fundamental. Heritage buildings are beautiful but can be more dangerous than contemporary architecture, especially when you want to position the scanner in challenging areas. Scan operators need to know all the risks for both themselves but also the public. In the UK we have to be very careful about legal liability, various levels of insurance and issues of corporate manslaughter.

Given the nature of the work such as Mount Rushmore, Rani ki Vav, and the Cathedral, I also have professional training in industrial rope access (IRATA).

The first issue is to determine the overall scope of the project, level of resolution and tolerance level of error. An understanding of the requirements for eventual output, such as CAD, BIM, 3D models etc., are also an issue. In terms of the actual scanning work, typically the first step is an extensive site visit – with lots of photography - and ideally, a review of existing CAD drawings to determine basic scan positions. The next issue is to determine the location of an existing survey control network.

4. Is the Cathedral different to other projects you already had? If so, what makes it different?

Given the size and height of the building, the Cathedral is certainly unique. I have had similar technical challenges at Mount Rushmore, and similar architectural challenges with Durham Cathedral.

5. Cologne Cathedral is a huge building. Is this your first project on such a large scale?

This is the biggest individual building that I have ever worked on, but in terms of size, similar projects include Schonbrunn Palace, Mount Rushmore and Durham Cathedral.

6. How many scanner-locations were needed in/around the Cathedral?

I have to confirm as some of the scans didn't work out due to site issues, file corruption, registration errors etc., but approximately 660+ scans.

7. Please tell me about the special challenges that you faced while scanning the Cathedral, collecting the data and merging it together.

The challenges specific to the Cathedral include the number of tourists (occlusions), the footprint-size of the building (requiring a lot of scanning), the architectural features such as the buttresses (more scanning), and of course the height of the two towers.

8. How big was the volume of collected data? (After the first phase of scanning/ the second phase/ in total)

Approximately 1.5 terabytes.

9. How much time did you have to invest in merging the data? Did it take longer/shorter than expected?

Given the number of scans, I knew that the registration would be a challenge. It took a long time, but came together perfectly.

10. What program did you use to work with the point-clouds? Are there other programs that could have been used?

There are a number of software applications on the market. The better ones include Bentley Pointools Autodesk ReCap (in connection with Revit), Trimble Realworks, Leica Cyclone and Z+F Laser Control.

Software-wise, I rarely use one software package and tend to jump between applications. That being said, Autodesk Recap is an excellent programme and I believe its currently free for students. I used ReCap to visualise the Cathedral interior and create real-time fly-through presentations. Overall though, I typically use the Z+F Laser Control for data conversion, registration and colourisation. I also use LC to repair damaged scan files.

I have also used a variety of other applications on this project including Leica Cyclone and the brilliant (and free) Cloud Compare. For meshing, either Mesh Lab or Autodesk ReMake are both great applications.

11. Is there something you would do different 'next time'?

Actually no, if I had to do the project over again, it would be done exactly the same way.

12: You said in the film that you are planning to get a 3D image of the Cathedral, down to the millimeter, with a level of error of 3mm at most. Did you achieve that goal?

I only saw the video briefly but the segment you were referring to occurred just after the scanning of the main Cathedral interior and the upper level loft. Given the architectural order of the two spaces, there was a lot of scanning, basically one set-up per bay (centre between columns). The result was a massive amount of overlap, well-over the normal 20%. In addition, we only used pulse scanners (not time of flight) with the distance between scans being very minimal, around 5 +/- meters.

Those two datasets were registered months back and I haven't generated an error report but yes, I think we have achieved the goal

Anlage 2: Experteninterview: Christoph Held**Einsatz von 3D-Laserscantechnik zum Visualisieren von historischen Gebäuden am Beispiel des Kölner Doms**

1. Wie hängt die Firma Z+F genau mit dem Projekt zusammen?

Douglas Pritchard hatte uns kontaktiert und uns von dem großen Projekt erzählt. Wir waren und sind sehr begeistert von der Idee und haben ihm unsere volle Unterstützung zugesagt. Wir sind sehr stolz an diesem Projekt beteiligt zu sein.

2. Für das Projekt wurden der Z+F IMAGER® 5010C und der Z+F IMAGER® 5010X eingesetzt. Gibt es noch andere Scanner, der Marke Z+F, die für das Projekt geeignet wären? Können Sie mir hierzu ergänzende Lektüre zukommen lassen?

Wir haben noch weitere Scanner in unserer Produktpalette, aber die beiden eingesetzten Scanner sind hierfür am besten geeignet, aufgrund ihrer Reichweite von bis zu 187m und der eingebauten HDR Farbkamera. Der 5010X hat noch den weiteren Vorteil, dass seine Daten direkt im Feld am Tablet zusammengesetzt und analysiert werden können. Dadurch kann man gleich sehen, ob alles vollständig ist und sicherstellen, dass im Nachhinein nicht Probleme auftreten, z.B. weil man einen Standpunkt vergessen hat. So etwas würde damit im Feld gleich bemerkt.

3. Welche Herausforderungen und Schwierigkeiten trafen während der Durchführung des Projektes auf Sie zu?

Persönlich:

Der Kölner Dom ist mit vielen Details und Figuren verziert und sehr verwinkelt. Durch die große Höhe des Gebäudes ist der Blickwinkel vom Boden aus nicht immer optimal. Viele Positionen wie auf den Türmen oder über dem Schlussstein sind schwer zugänglich und erfordern zusätzlichen Sicherungsaufwand. Die Lichtverhältnisse im Dom sind schwierig, aufgrund der großen, hellen Fenster und gleichzeitig sehr dunklen Ecken, wenig ausgeleuchteten Ecken.

4. Wie sind Sie damit umgegangen?

Um Abschattungen zu vermeiden, mussten sehr viele Positionen eingenommen werden. Für einen optimaleren Blickwinkel wurde von unterschiedlichen Ebenen und mit anderen Hilfsmitteln gescannt (z.B. Hubwagen, Gerüste, etc.). Für einige Aufnahmen wurden von DP spezielle Gerüste konzipiert und von der Dom-bauhütte gebaut.

Um die schwierigen Lichtverhältnisse brauchten wir uns aufgrund der in den Scanner integrierten HDR Kamera keine Sorgen zu machen. Sie meisterte die hohen Kontraste vollautomatisch. Sehr dunkle Ecken wurden darüber hinaus mit dem Z+F SmartLight ausgeleuchtet, eine optionale Leuchte, die auf den Scanner montiert wird. Da das SmartLight die Szene von der Position des Scanners beleuchtet entstehen keine zusätzlichen Schatten auf den Bildern.

5. Würden Sie beim „nächsten Mal“ etwas anders machen?

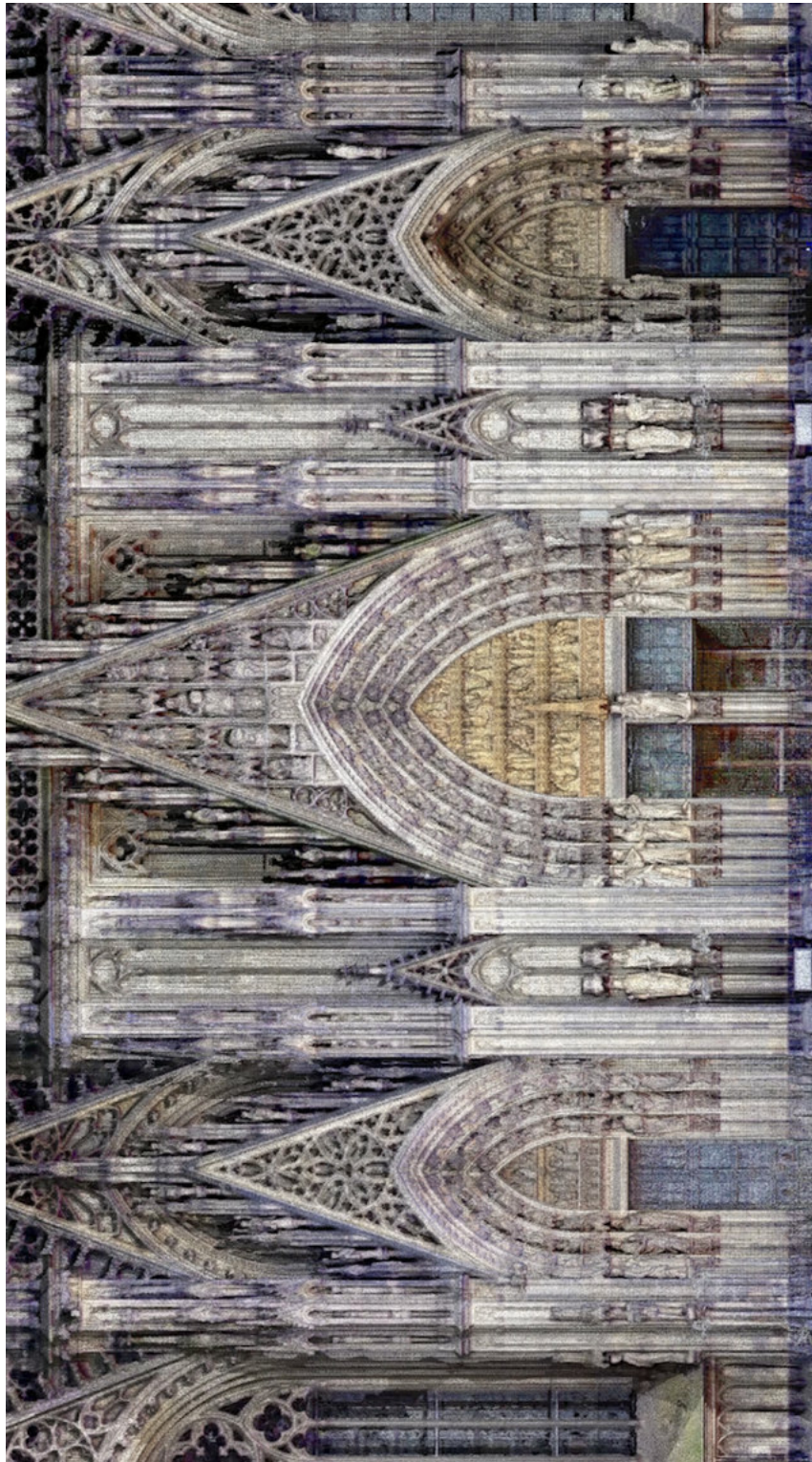
persönlich: nein.

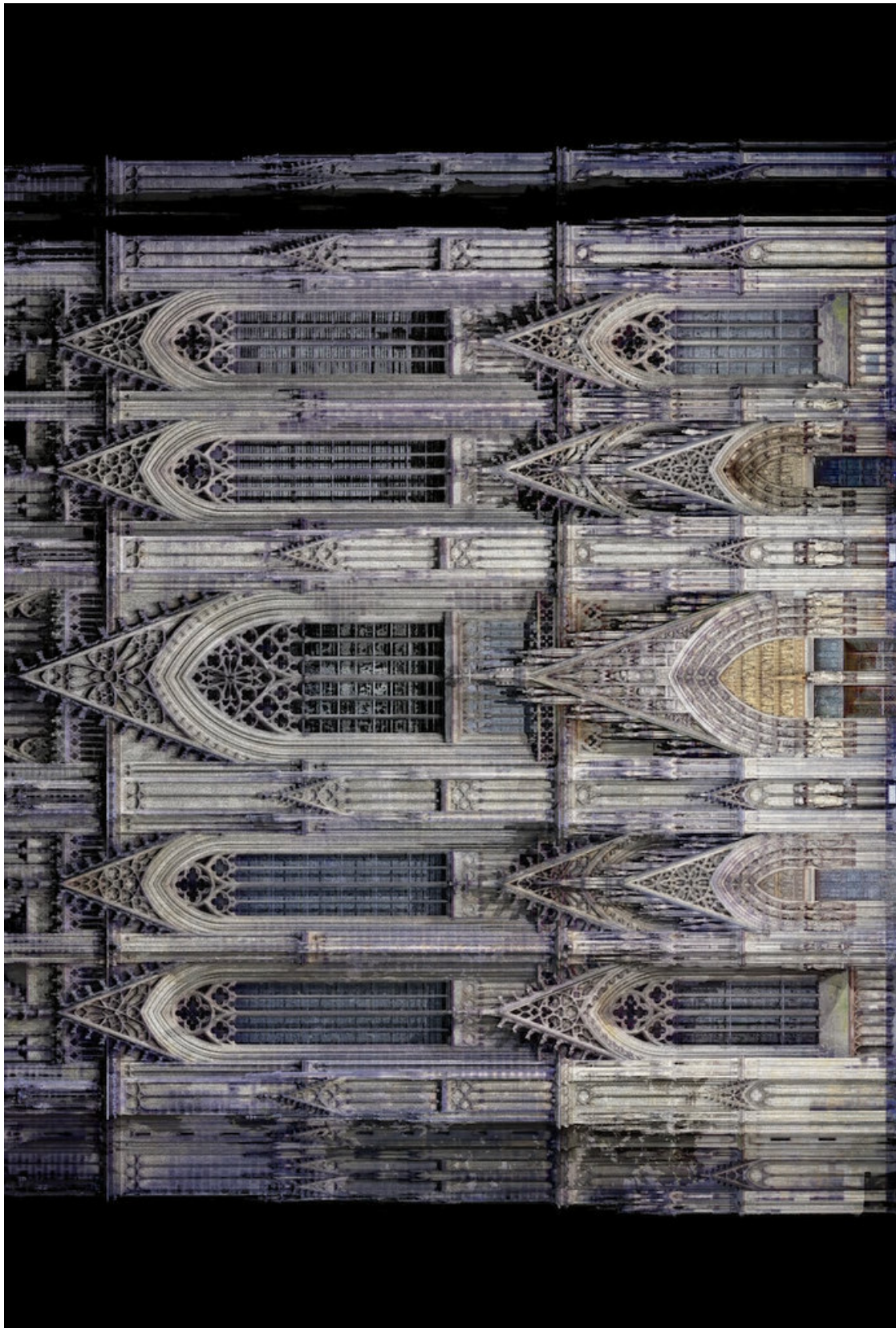
6. Welche Anforderungen muss ein Computer erfüllen, um diese Datenmenge verarbeiten zu können?

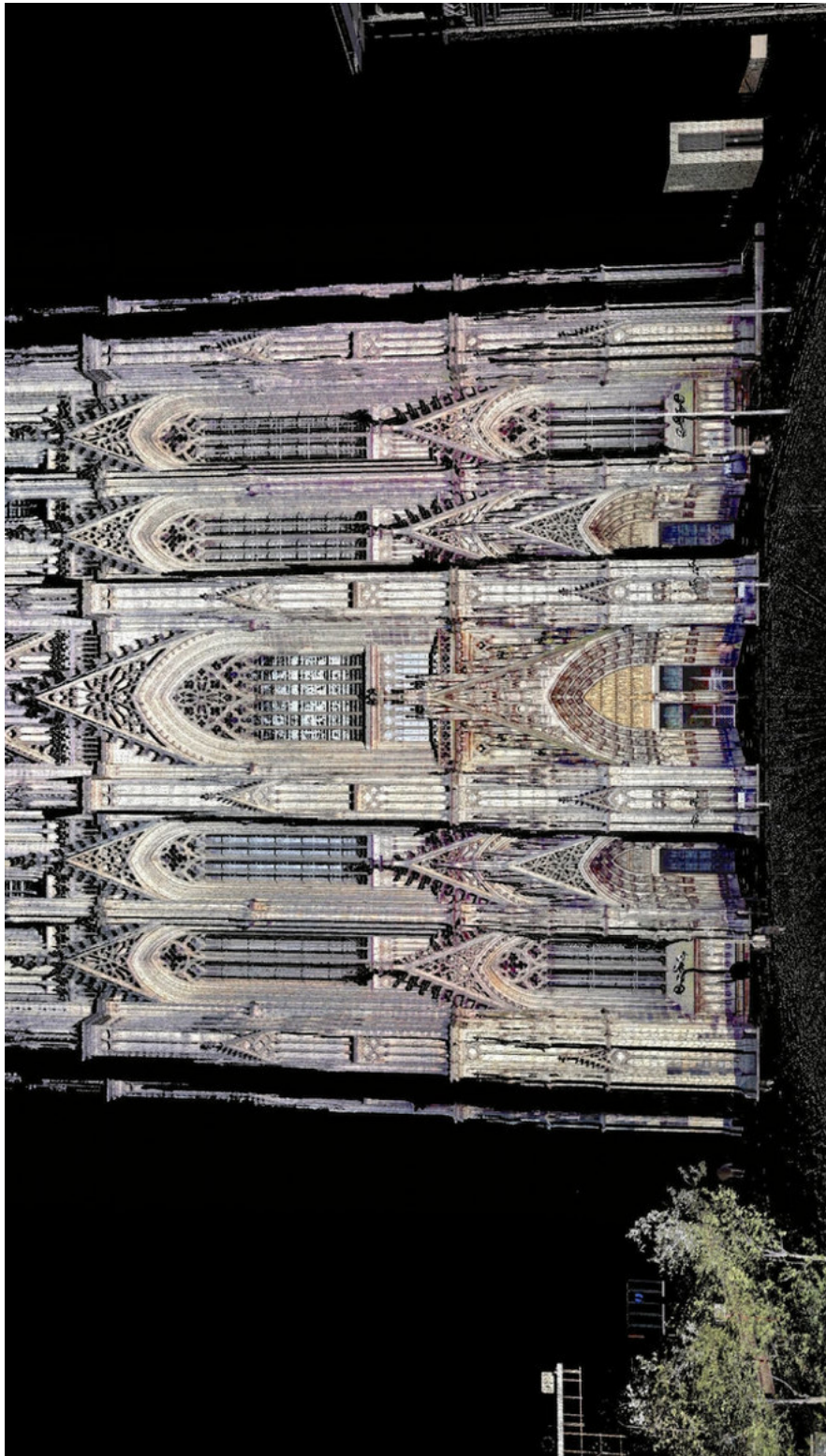
Er sollte viel RAM und Festplattenspeicher haben. Leistungsfähige Prozessoren heutiger Desktopmaschinen reichen aber aus. Es kommt mehr auf eine leistungsfähige Software an. Es hängt alles stark von der eingesetzten Software ab
→ DP

7. Welche Anwendungssoftware wird für die Arbeit mit den Punktwolken eingesetzt? Gibt es noch andere mögliche Programme?

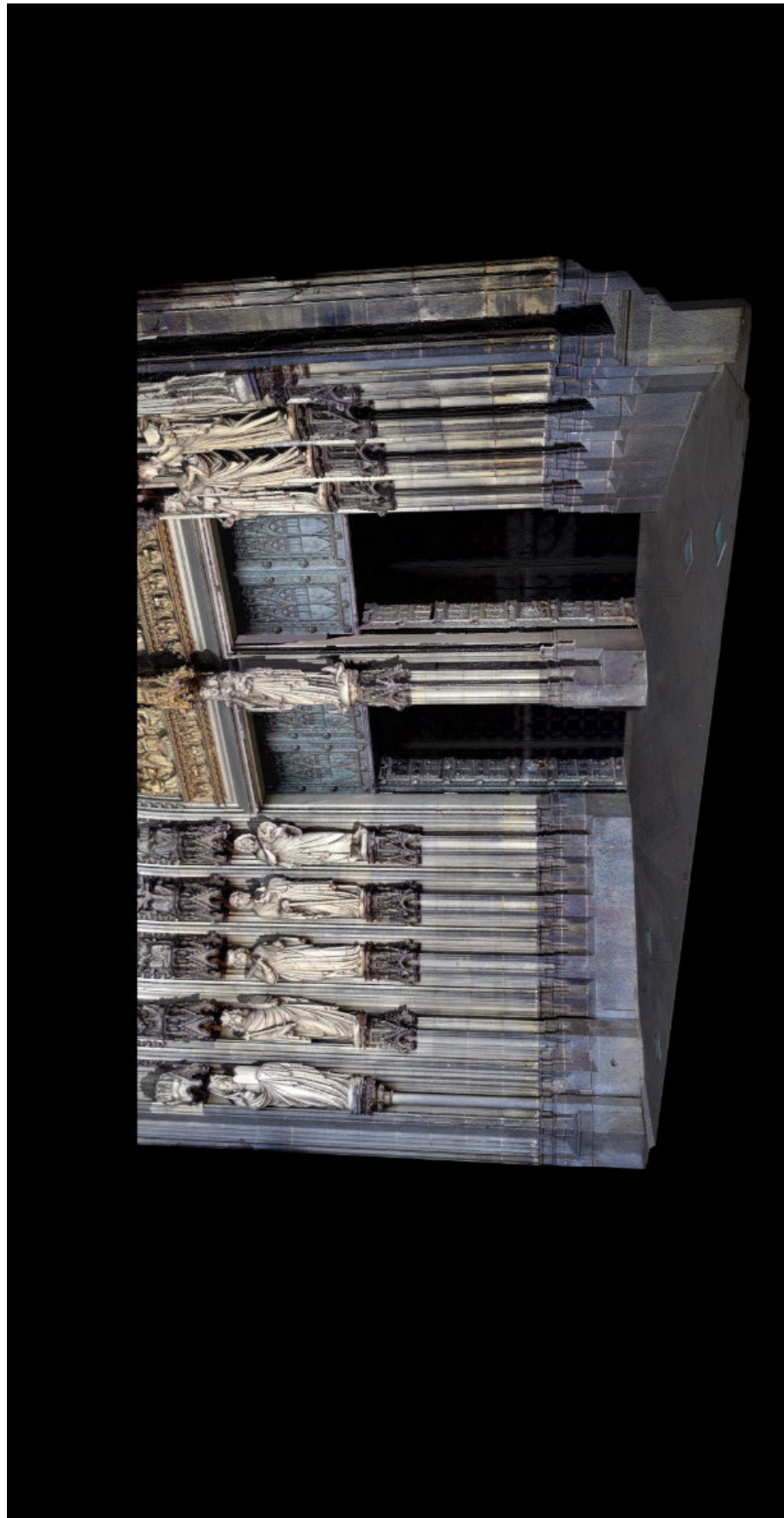
Es gibt einige Softwarelösungen die hier eingesetzt werden können. Soweit mir bekannt, setzt DP hauptsächlich Autodesk Recap ein und Leica Cyclone. Das hängt von den Ausgabeprodukten und den evtl. bereits vorhandenen Software-lösung an der Universität ab. Es gibt aber noch einige weitere Produkte.

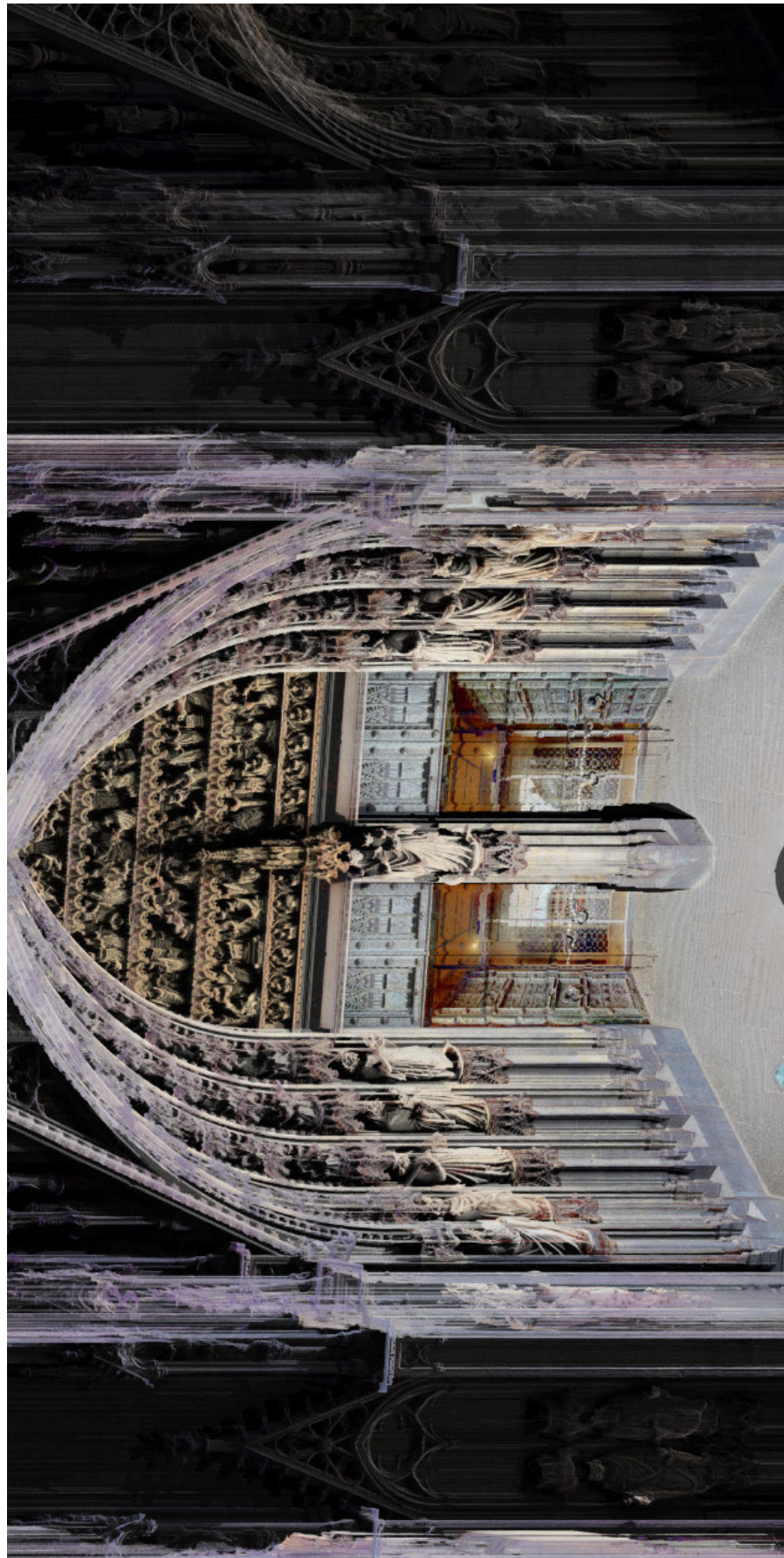
Anlage 3: 3D-Modell des Kölner Doms 1 (Quelle: Douglas Pritchard)

Anlage 4: 3D-Modell des Kölner Doms 2 (Quelle: Douglas Pritchard)

Anlage 5: 3D-Model des Kölner Doms 3 (Quelle: Douglas Pritchard)

Anlage 6: Ausschnitt des 3D-Model des Kölner Doms 1 (Quelle: Douglas Pritchard)



Anlage 7: Ausschnitt des 3D-Model des Kölner Doms 2 (Quelle: Douglas Pritchard)

Anlage 8: Schäden am Kölner Dom (Quelle: Eigene Darstellung)











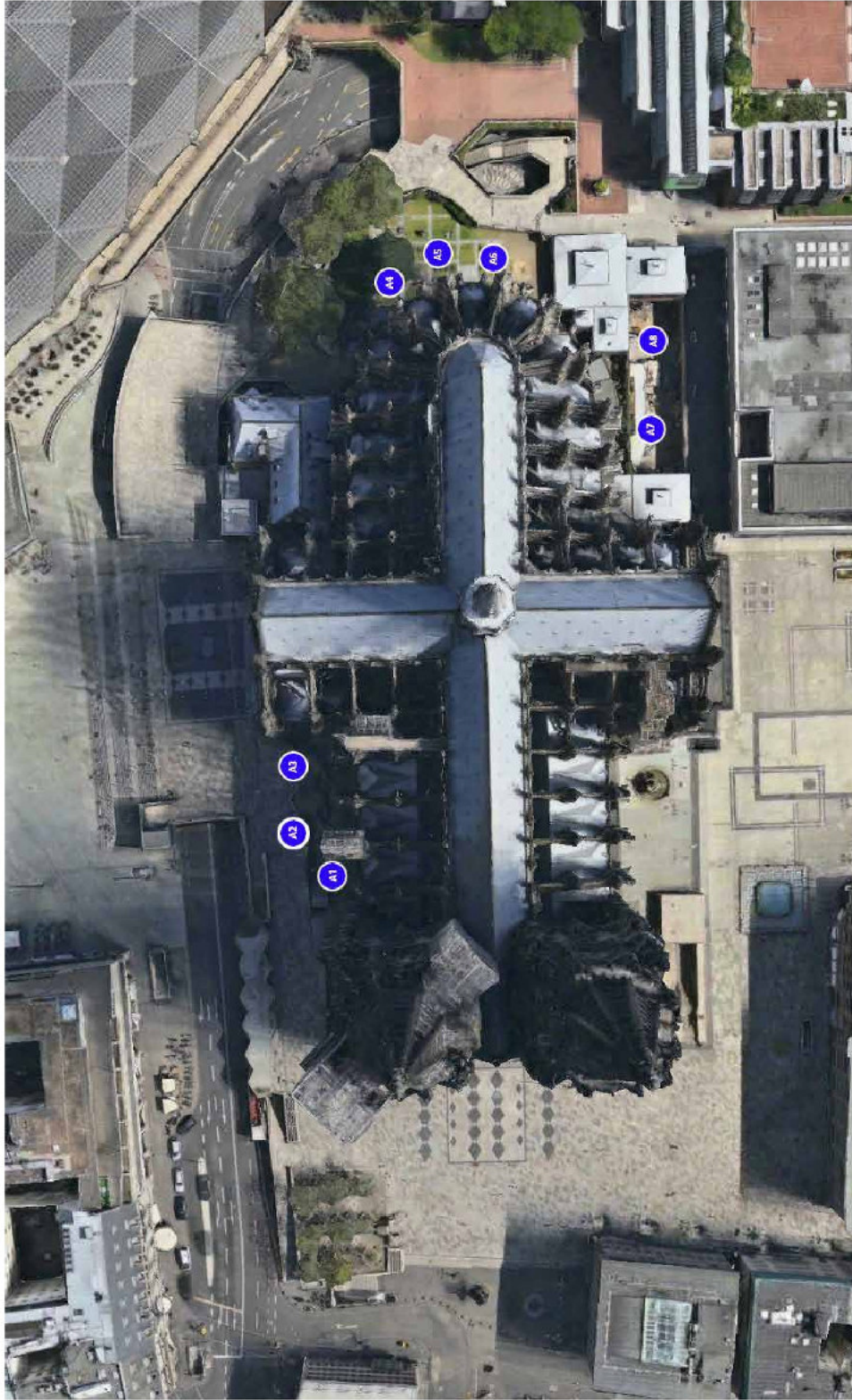
Anlage 9: Restaurierte Figur (Quelle: Eigene Darstellung)

Anlage 10: Phase Two – Cologne Cathedral Scanning Project (Quelle: Douglas Pritchard)

Phase Two
Cologne Cathedral Scanning Project

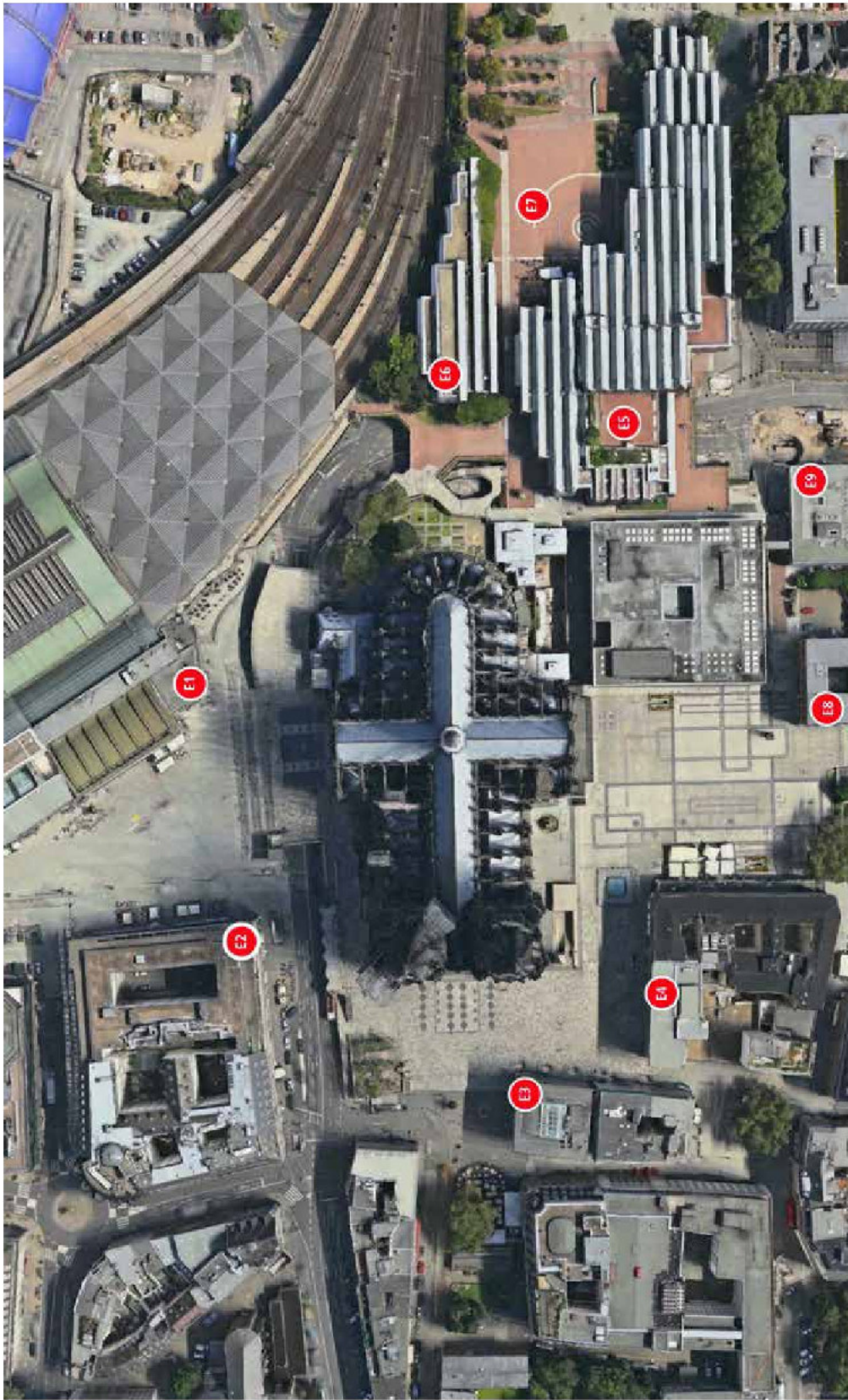
Douglas Pritchard
Heriot Watt University





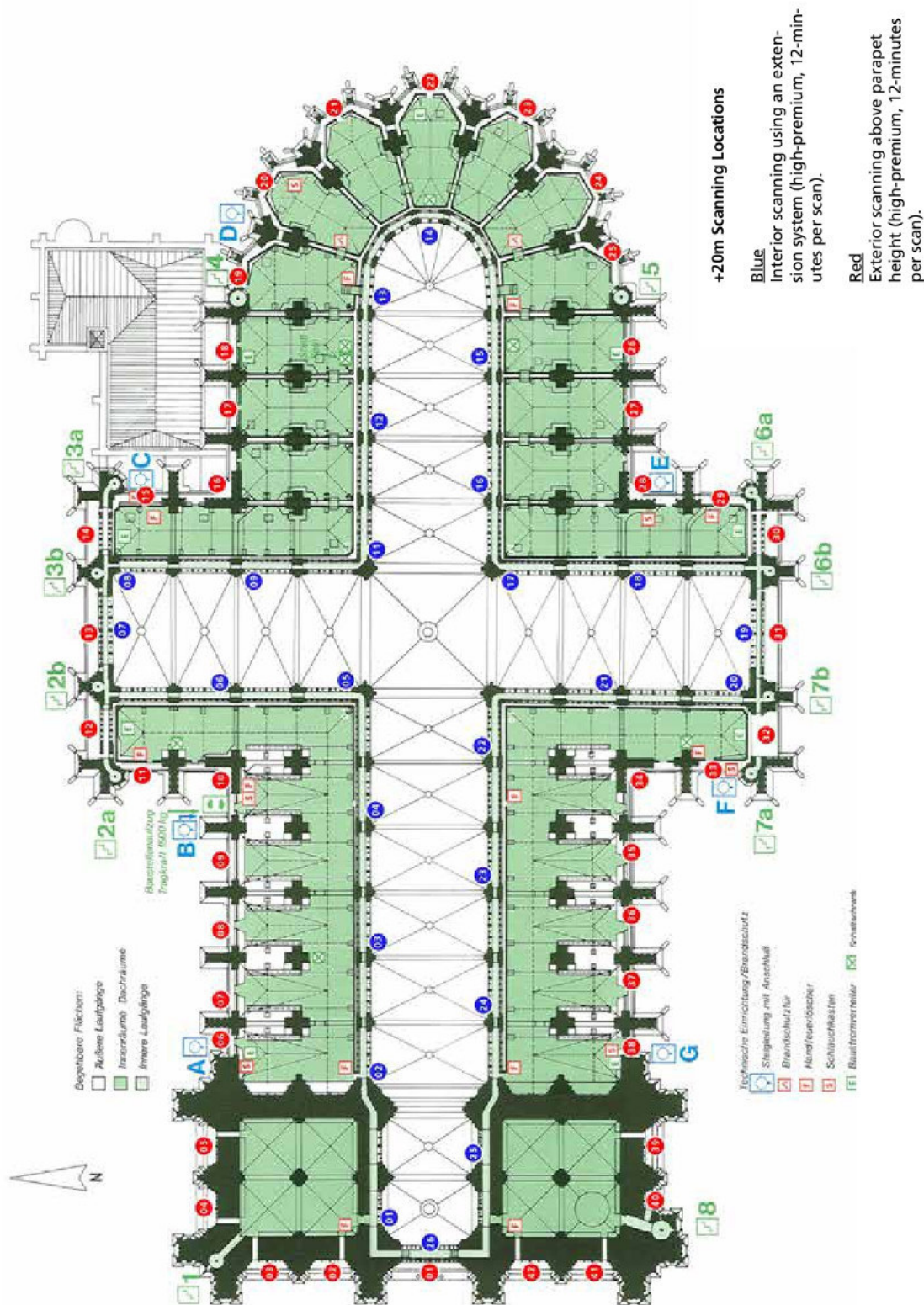
Fill-in Scanning (45 mins per scan)

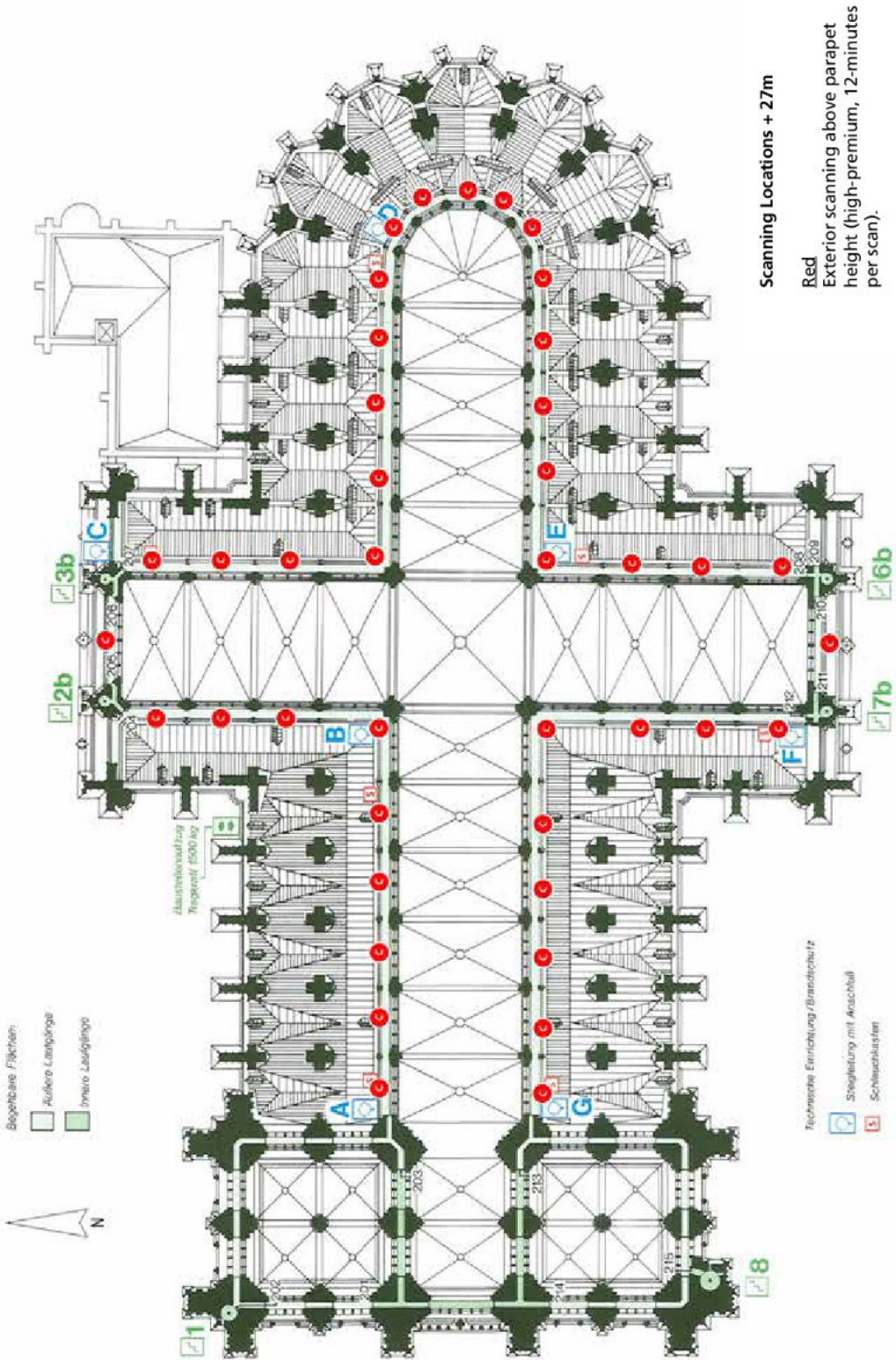
On the roof of the camera shop, in-between the shops and the Cathedral, rear of the Cathedral and in the masonry workshop.

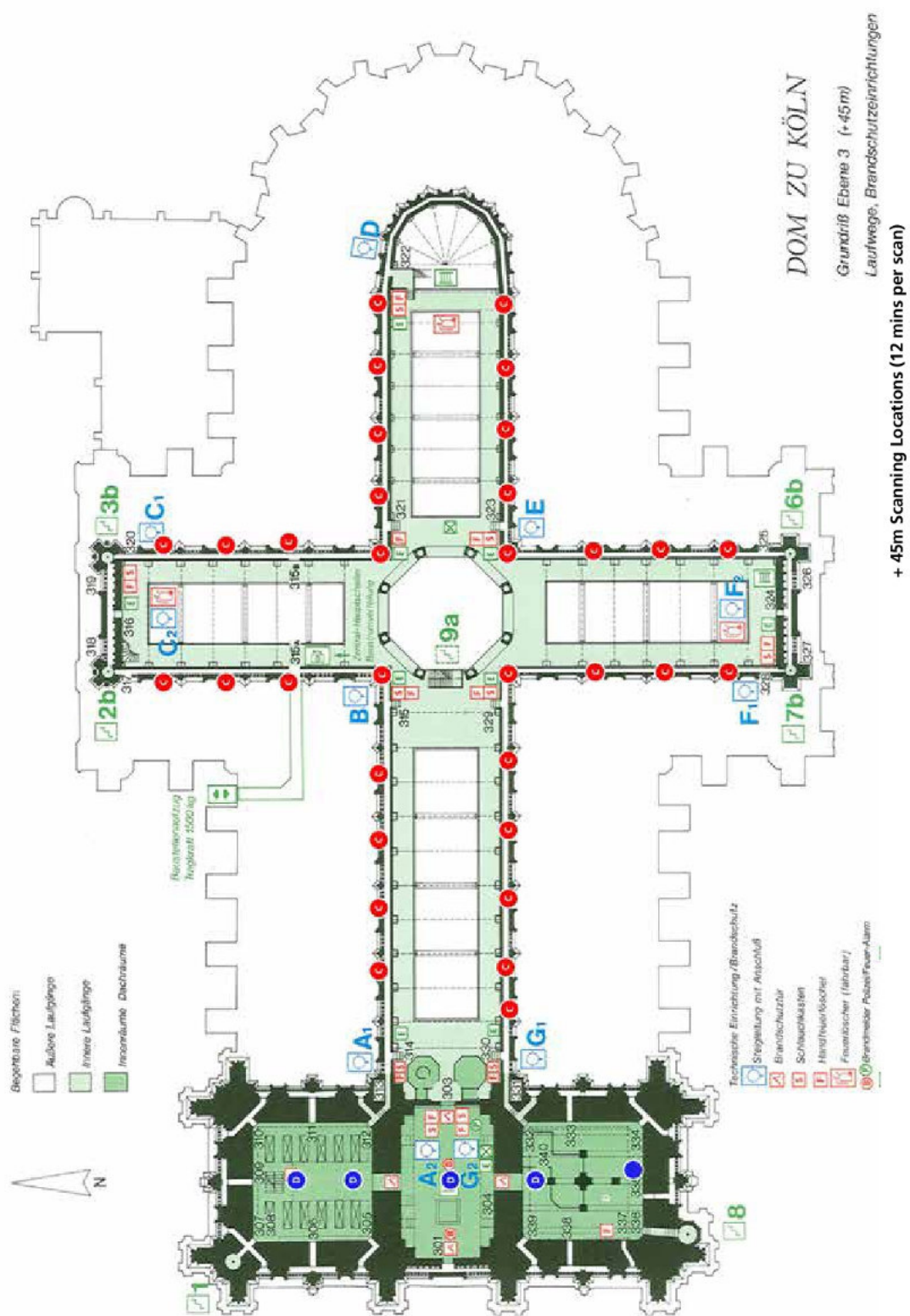


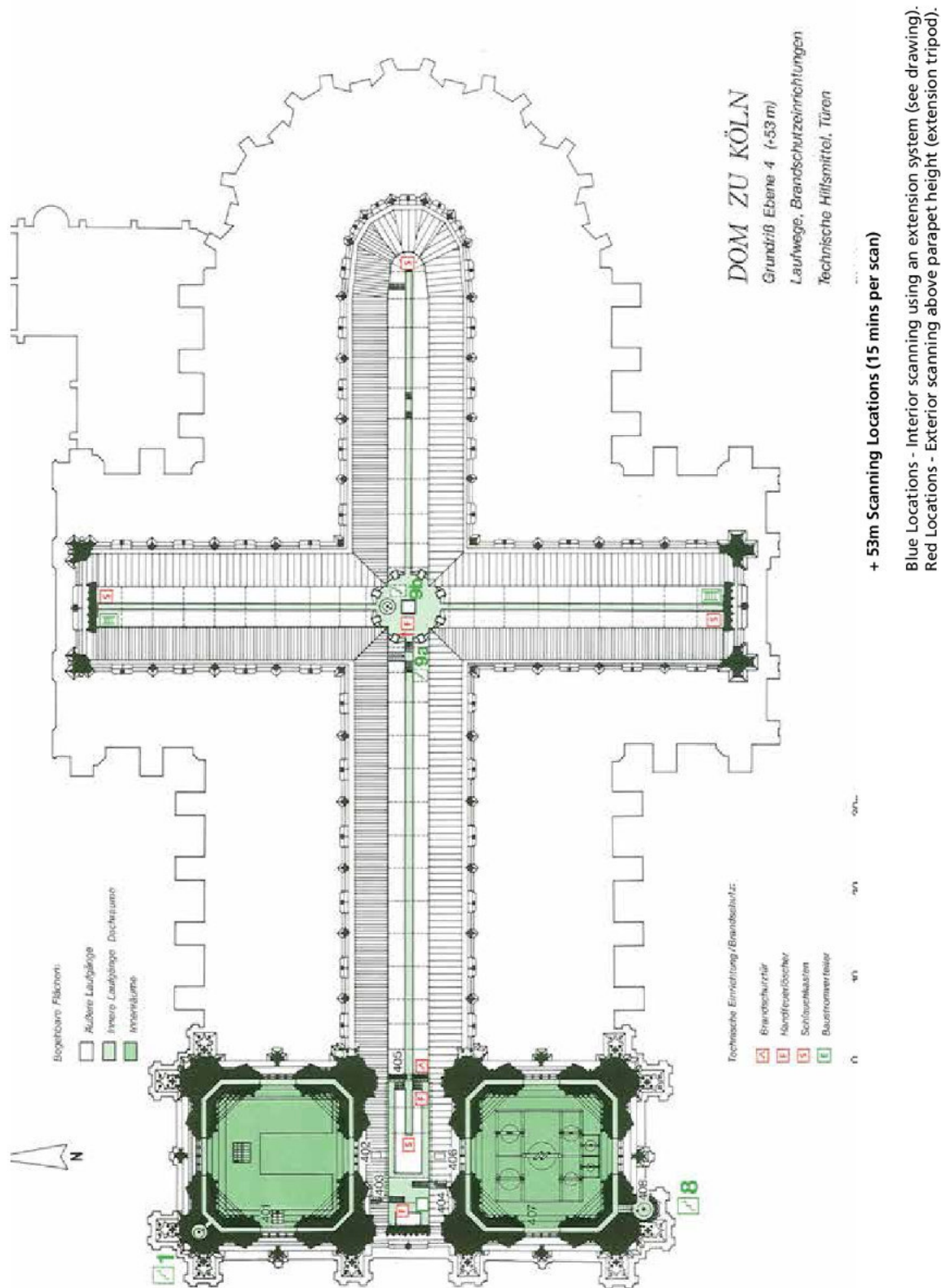
Further Exterior Scanning (30 mins per scan)

Most of these scan positions are on roof tops (i.e. the corner of the rail station or on the gallery) and will require permission.











Z+F 5010C Terrestrial Laser Scanner

Dimensions (w x d x h): 170 x 286 x 395 mm

Weight of scanner: 9.8 kg







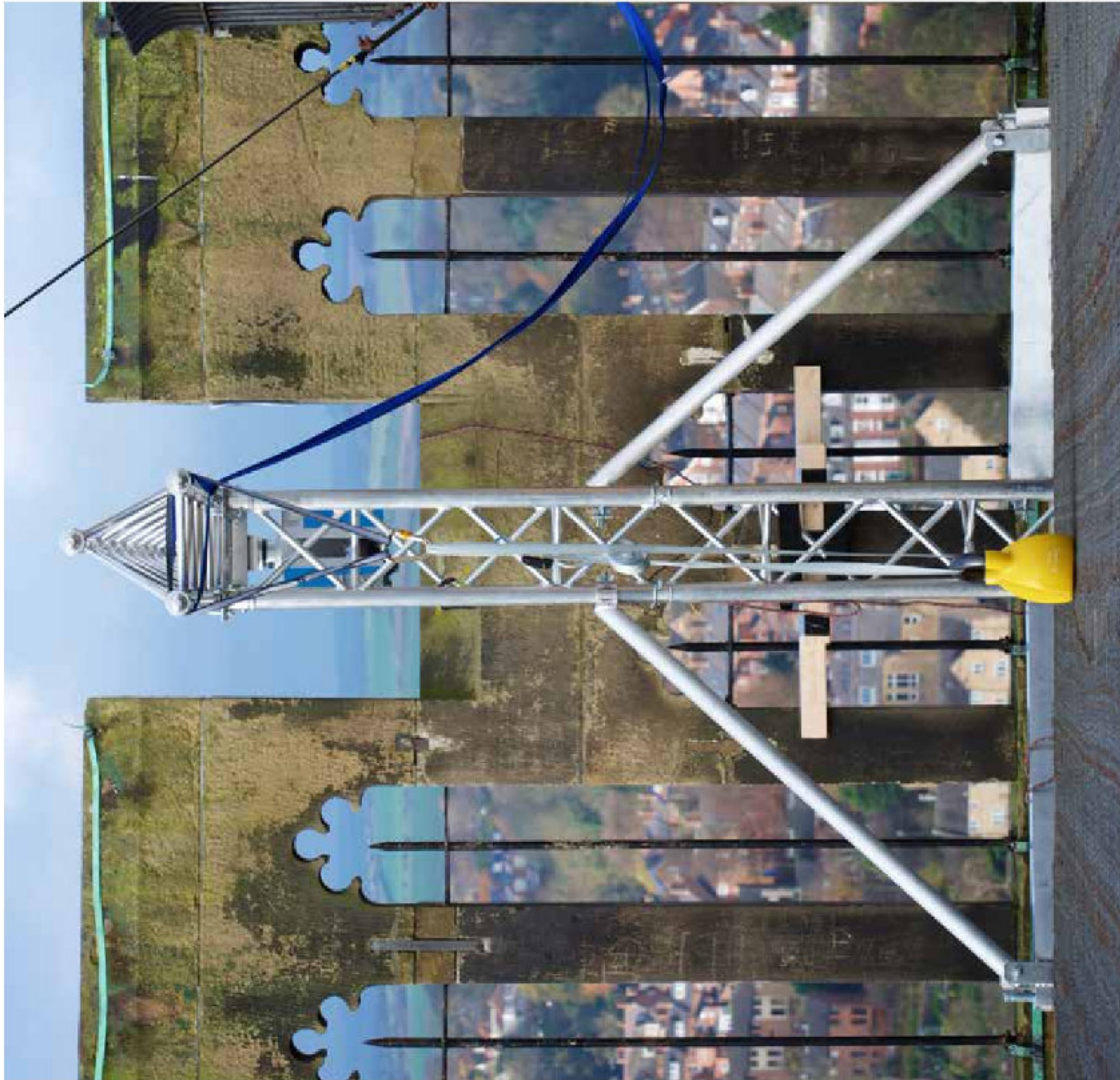
Durham Cathedral

The rig with outrigger legs and counter balance (the yellow weight). Note the blue sling, all rigs require a secondary fall arrest system.



Durham Cathedral

I would suggest a similar system for the Cathedral, assuming that there is enough clearance. One proposed difference is a turn-table system connecting the vertical truss to the horizontal truss. This will make the system more manoeuvrable.



Durham Cathedral Project

The vertical box-truss consists of two 1-meter sections with two outriggers. The rig was positioned against the stone with a wooden blocking.





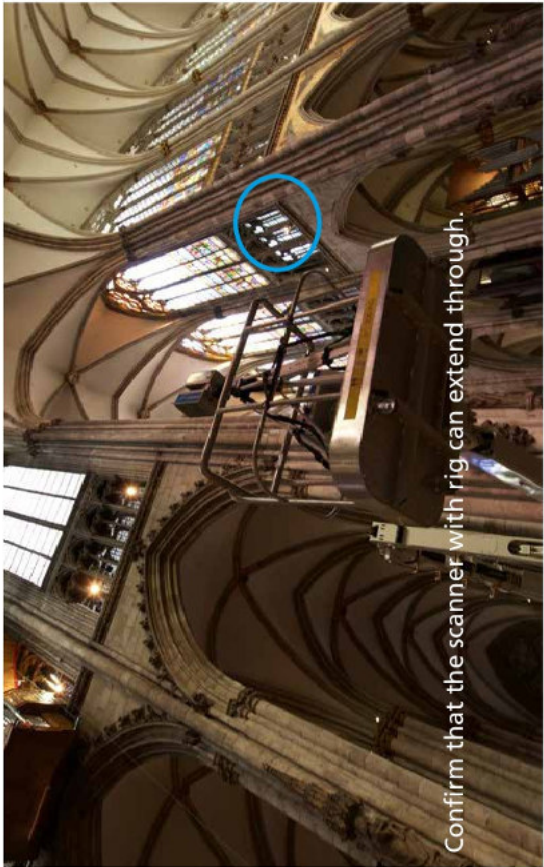
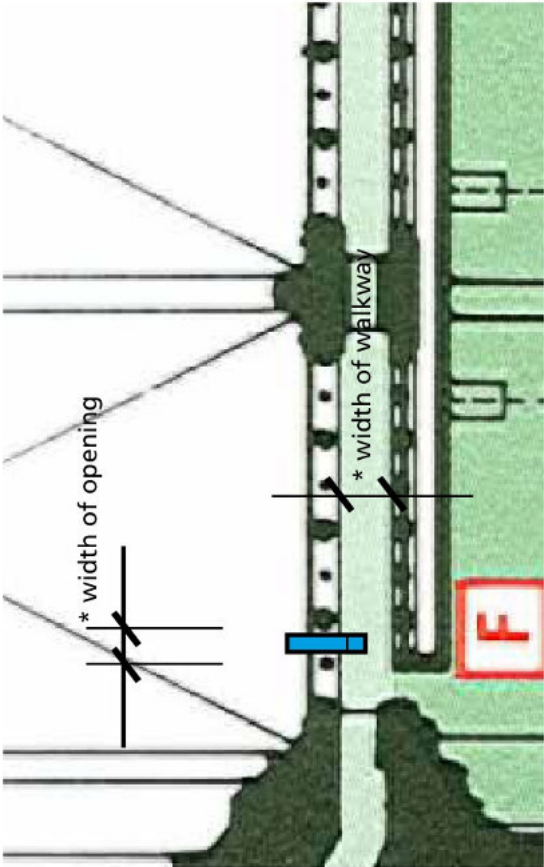
St Michaels Mount Project

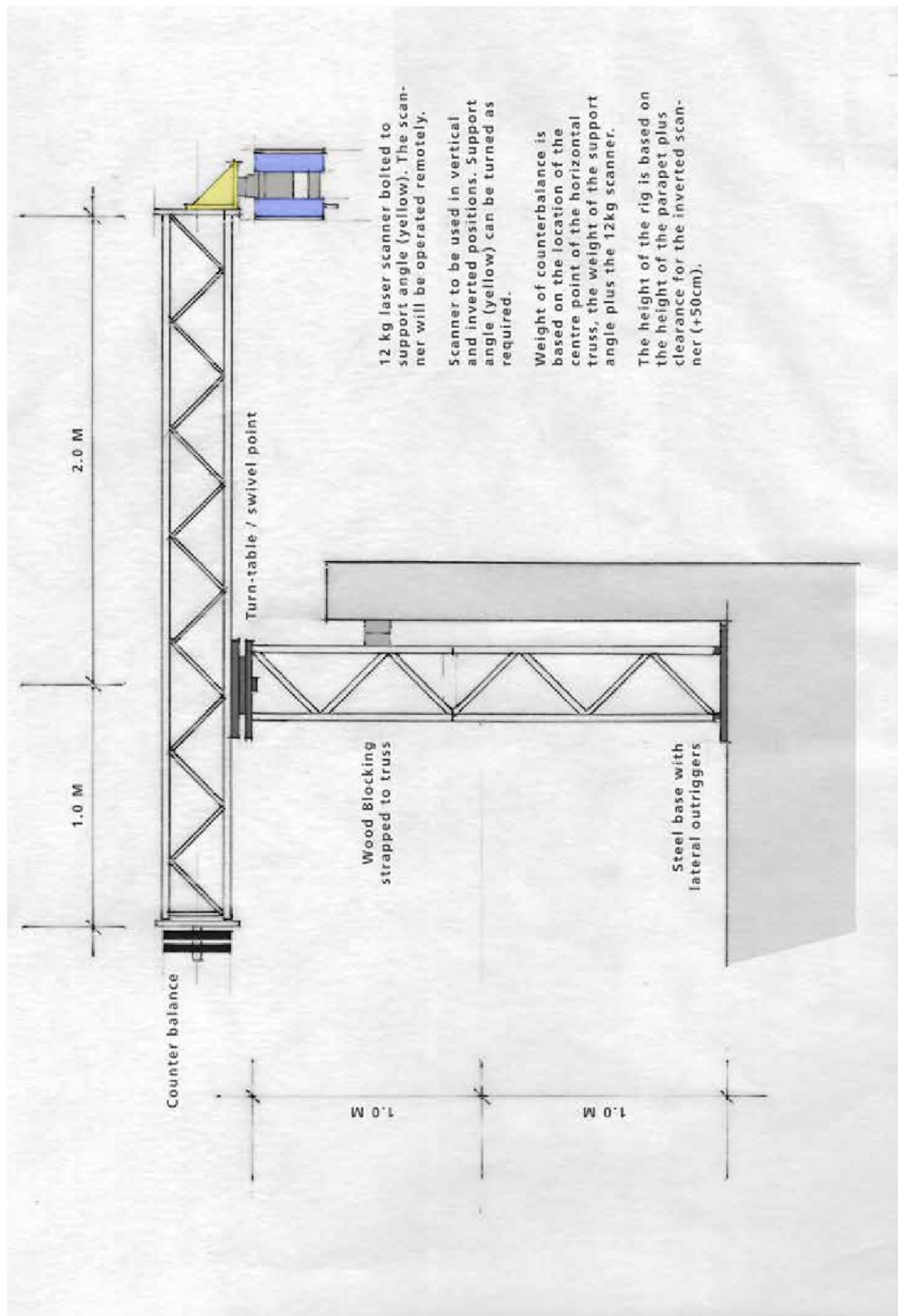
Note supporting outriggers, Positioning of rig and scanner required 3 people. The scanner was operated remotely via wifi.

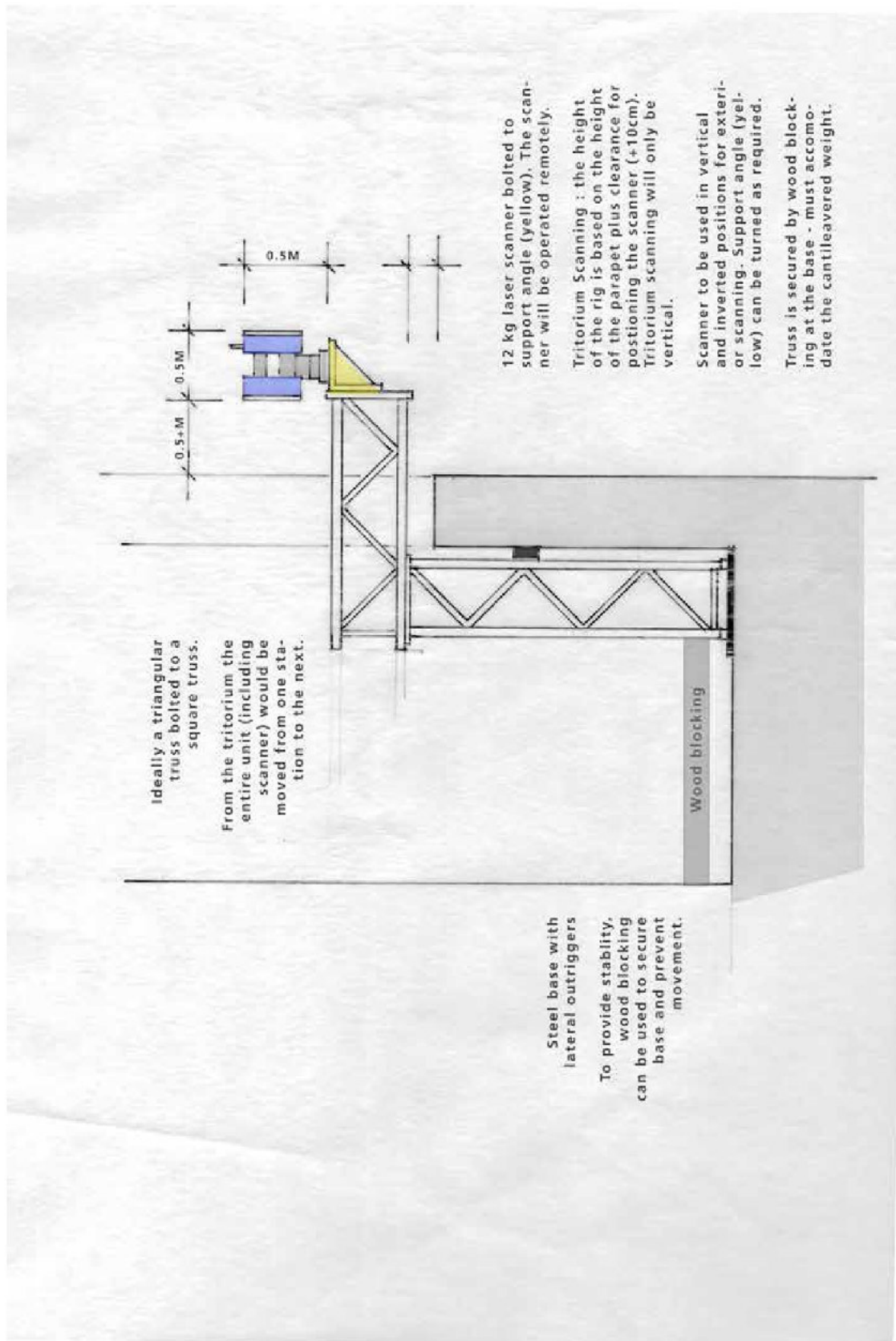
St Michaels Mount Project

View of truss base-plate, steel angle and bolted scanner bracket.









Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, den TT. Monat JJJJ

Vorname Nachname